

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2019

Vladimír Horák

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Měniče střídavého napětí**  
**AC Voltage Converters**

2019

Vladimír Horák

## Zadání bakalářské práce

Student: **Vladimír Horák**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612R003 Aplikovaná elektronika  
Téma: **Měniče střídavého napětí**  
**AC Voltage Converters**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor možných variant řešení jednofázového a třífázového měniče střídavého napětí (softstartéru).
2. Proveďte základní analýzu trhu komerčně dostupných měničů.
3. Na základě pokynů vedoucího bakalářské práce proveďte ověření a realizaci jednofázového měniče pro různé typy zátěže.

### Seznam doporučené odborné literatury:

<https://library.e.abb.com/public/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/Softstarter-%20handbook.pdf>  
<https://www.enika.cz/data/files/produkty/komponenty/pohony/RSBS.pdf>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Sládeček, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 30. dubna 2019

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Václavu Sládečkovi, Ph.D., za pomoc při měření.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou střídavých měničů napětí v oblasti měkkého rozběhu zátěže neboli soft startu. Důraz je kladen na používané varianty řešení jednofázového a třífázového střídavého měniče napětí ve vztahu ke spouštěné zátěži. Mezi uvedené informace patří i detailnější popis funkcí jednotlivých variant. Na základě provedeného teoretického rozboru střídavých měničů měkkého rozběhu je provedena analýza běžného trhu k poskytnutí uceleného pohledu na kvalitu a kvantitu komerčně dostupných měničů.

Dále byla uskutečněna samotná realizace měniče s funkcí řízeného rozsahu výstupního napětí a implementovaného měkkého rozběhu. Tato funkce měniče byla ověřena na rozdílných elektrických spotřebičích a je zaznamenána v podobě grafických průběhů.

## **Klíčová slova**

Střídavý měnič napětí, měkký rozběh, tyristorová regulace, motor, tyristor, triak, střídavé napětí

## **Abstract**

This thesis deals with a issue of AC Voltage Convertors in the area of soft run-up of a load to put it differently soft start. The emphasis is laid on using of solving variants for both a single-phase and a three-phase AC voltage converter in relation to a starting of the load. Among mentioned pieces of information there is also more detailed description of these particular variants. On the bases of conducted theoretical analysis of AC soft start converters there is the analysis of standard market accomplished in order to provide a complete view on quality and quantity of commercially available converters.

In addition to this thesis there was carried out the realization of the converter equipped with the range control output voltage and implemented softstart function. This converter function was successfully tried and tested for various electrical appliances and particular graphic representations were written down.

## **Key Words**

AC Voltage converter, soft start, thyristor regulation, motor, thyristor, triac, alternating voltage

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	8
Seznam obrázků .....	9
Seznam tabulek .....	11
1 Úvod.....	12
2 Struktura střídavých měničů napětí.....	13
2.1 Tyristor .....	13
2.1.1 Výstupní V-A charakteristika tyristoru .....	14
2.2 Triak .....	15
2.2.1 Výstupní V-A charakteristika triaku .....	15
2.3 Jednofázové řízení příkonu .....	16
3 Rozbor možných variant řešení střídavého měniče napětí.....	19
3.1 Jednofázové řešení měkkého startu pro motorickou zátěž .....	19
3.1.1 Vícenásobné spouštění jednofázových motorických zátěží .....	21
3.1.1.1 Paralelní spouštění.....	21
3.1.1.2 Kaskádní spouštění .....	21
3.1.2 Druhy řízení výkonového prvku pro jednofázový měkký start.....	23
3.1.2.1 Reléové řízení pro rozběhový rezistor.....	24
3.1.2.2 Řízení pomocí komparátoru .....	25
3.1.2.3 PWM řízení pomocí mikroprocesoru 8051 .....	27
3.2 Třífázové řešení měkkého startu pro motorickou zátěž.....	30
3.2.1 Metody připojení softstartéru k motorické zátěži .....	32
3.2.1.1 Sériově s motorem (In-Line) .....	32
3.2.1.2 Paralelně s motorem (Inside-Delta).....	33
3.2.2 Třífázové řízení napětí pro třífázovou motorickou zátěž .....	35
3.2.2.1 Řízení pomocí komparátoru .....	35
3.2.3 Dvoufázové řízení měkkého startu pro třífázovou motorickou zátěž .....	38
3.2.3.1 Regulace fázové nesouměrnosti .....	41
4 Analýza trhu komerčně dostupných střídavých měničů .....	43
4.1 Jednofázové střídavé měniče s měkkým rozběhem.....	45
4.1.1 Univerzální analogový softstartér (SOLSTART) .....	45
4.1.2 Regulátor soft start/stop pro čerpadlové motory .....	46
4.1.3 Polovodičový softstartér pro kompresorové motory .....	48

4.2	Třífázové střídavé měniče s měkkým rozběhem .....	51
4.2.1	Mikroprocesorový softstartér řady STC 52 pro univerzální použití .....	51
4.2.2	Polovodičový softstartér pro kompresorové motory .....	53
5	Realizace a ověření jednofázového střídavého měniče .....	56
5.1	Realizace .....	56
5.2	Ověření .....	58
5.2.1	Odporová zátěž .....	58
5.2.2	Motorická zátěž.....	60
6	Závěr .....	62
	Použitá literatura .....	63
	Seznam příloh.....	65



## Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
<b>DOL</b>	Direct On Line
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>LCD</b>	Liquid Crystal Display
<b>MOSFET</b>	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
<b>NTC</b>	Negative Temperature Coefficient
<b>PI</b>	Proportional Integral
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>RAM</b>	Random Access Memory
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>SOLSTART</b>	Analog Softstarter

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Kompozice a schématické značení tyristoru [1] .....	13
Obrázek 2 – Výstupní V-A charakteristika tyristoru [1] .....	14
Obrázek 3 – Struktura a schématická značka triaku [2] .....	15
Obrázek 4 – Výstupní V-A charakteristika triaku [1] .....	16
Obrázek 5 – Zapojení jednofázového řízení příkonu (vlevo) a řídící charakteristika (vpravo) [3] .....	17
Obrázek 6 – Průběh napětí a proudu při $\alpha = 130^\circ$ pro různé typy zátěže [3] .....	17
Obrázek 7 – Princip softstartéru .....	19
Obrázek 8 – Blokové schéma mechatronického systému .....	20
Obrázek 9 – Závislost momentu na otáčkách a označení pracovních mechanismů. [4] .....	20
Obrázek 10 – Zjednodušené schéma zapojení pro paralelní spouštění motorů [4] .....	21
Obrázek 11 – Zjednodušené schéma zapojení pro kaskádní spouštění motorů [4] .....	22
Obrázek 12 – Grafické vyjádření zatěžovatele Z .....	23
Obrázek 13 – Varianty zapojení pro řízení výkonového rezistoru [6] .....	24
Obrázek 14 – Blokové schéma měkkého startu pro jednofázovou zátěž [7] .....	25
Obrázek 15 – Princip spínání nulového napětí [8] .....	26
Obrázek 16 – Blokové schéma vnitřní struktury mikroprocesoru 8051 [9] .....	27
Obrázek 17 – Ideální vykreslení sinusového signálu a způsob modulace výst. napětí [11][10] .....	28
Obrázek 18 – Blokové schéma PWM řízení pomocí mikroprocesoru 8051 [11] .....	29
Obrázek 19 – Kompletní schéma zapojení PWM řízení pomocí mikroprocesoru 8051 [12] .....	30
Obrázek 20 – Časový průběh napětí v jednotlivých fázích [13] .....	31
Obrázek 21 – Zapojení zdroje a spotřebiče do hvězdy [13] .....	32
Obrázek 22 – Zapojení spotřebiče do trojúhelníku [14] .....	32
Obrázek 23 – Zapojení softstartéru In-Line [4] .....	33
Obrázek 24 – Zapojení softstartéru Inside-Delta [4] .....	34
Obrázek 25 – Zapojení síťového stykače a) Uvnitř trojúhelníku b) Mimo trojúhelník [5] .....	35
Obrázek 26 – Třífázový softstartér s 6-ti tyristory [14] .....	36
Obrázek 27 – Blokové schéma řízení tyristorového měniče [16] .....	37
Obrázek 28 – Zjednodušené blokové schéma třífázového řízení měkkého startu [15] .....	38
Obrázek 29 – Zapojení tyristorů ve dvoufázovém softstartéru [17] .....	38
Obrázek 30 – Průběh fázových napětí při řídícím úhlu 5ms [17] .....	39
Obrázek 31 – Průběh efektivní hodnoty proudu a) s proud. omezením b) bez proud. omezení [17] .....	40
Obrázek 32 – Průběh napěťové rampy pro dvoufázový a třífázový softstartér [17] .....	40
Obrázek 33 – Porovnání dvoufázového a třífázového softstartéru při řízení točivého momentu [17] ..	41
Obrázek 34 – Regulator v uzavřené smyčce pro jednu fázi [18] .....	41
Obrázek 35 – Grafické znázornění rozběhové, doběhové rampy a počátečního napětí [4] .....	44
Obrázek 36 – Schéma zapojení přípravku se zátěží [19] .....	45

Obrázek 37 – Vnější vzhled regulátoru měkkého rozběhu a doběhu [20] .....	47
Obrázek 38 – Blokové schéma zapojení polovodičového softstartéru [21] .....	48
Obrázek 39 – Vzhled polovodičového softstartéru pro kompresorové motory [21] .....	51
Obrázek 40 – Vzhled mikroprocesorového softstartéru řady STC 52 [22] .....	52
Obrázek 41 – Blokové schéma a vzhled polovodičového softstartéru [23] .....	54
Obrázek 42 – Blokové schéma zapojení U2008B pro měkký rozběh zátěže [24] .....	56
Obrázek 43 – Výsledný vzhled realizovaného měniče s popisem .....	57
Obrázek 44 – Další pohledy na realizovaný měnič .....	57
Obrázek 45 – Schéma zapojení měniče pro ověření funkce .....	58
Obrázek 46 – Průběhy napětí (žlutě) a proudu (zeleně) pro 243V (vlevo) a 200V (vpravo) .....	58
Obrázek 47 – Průběhy napětí (žlutě) a proudu (zeleně) pro 149V (vlevo) a 49,3V (vpravo) .....	59
Obrázek 48 – Napěťová rampa měkkého rozběhu odporové zátěže pro různé kapacity .....	59
Obrázek 49 – Průběhy napětí (žlutě) a proudu (zeleně) pro 241V (vlevo) a 201V (vpravo) .....	60
Obrázek 50 – Průběhy napětí (žlutě) a proudu (zeleně) pro 150V (vlevo) a 46V (vpravo) .....	60
Obrázek 51 – Napěťová rampa měkkého rozběhu motorické zátěže pro různé kapacity .....	61

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Specifikace lehké a těžké zátěže [4].....	43
Tabulka 2 – Přehled uváděných parametrů od výrobce [19].....	46
Tabulka 3 – Přehled uváděných parametrů od výrobce [20].....	47
Tabulka 4 – Přehled základních parametrů softstartéru [21] .....	49
Tabulka 5 – Přehled základních parametrů softstartéru řady STC 52 [22] .....	52
Tabulka 6 – Popis indikací diod [23] .....	54
Tabulka 7 – Přehled základních parametrů polovodičového softstartéru [23].....	55
Tabulka 8 – Přehled funkcí spínače S3 [23].....	55

# 1 Úvod

Přijde-li řeč na měnič v elektrotechnice, jeho popis by nejspíše směřoval k tvrzení, že slouží na přeměnu elektrické energie v nejruznější formě, do nejruznější formy. U střídavého měniče platí, že převádí hodnotu střídavého napětí na hodnotu nižší, pokud ne, jedná se o problematiku jiného měniče. Tato práce se vnoří více do použití střídavých měničů, konkrétně do oblasti měkkého rozběhu zátěže principem postupného navyšování přírodního napětí. Poukazuje tak na jiný, praktičtější pohled využití měniče napětí

První kapitola je motivačně směřována na strukturu střídavých měničů s cílem pochopit základní funkci používaných polovodičů a utvořit si tak teoretický základ pro následující kapitoly, zejména kapitoly realizace a ověření.

Druhá kapitola se už zaměřuje na konkrétní varianty řešení střídavého měniče pro měkký rozběh, a to jak ve vztahu ke spouštěné zátěži, tak i ve vztahu vnitřního řízení. Rozbor se týká jednofázových i třífázových střídavých měničů.

Třetí kapitola, v návaznosti na druhou, analyzuje komerční trh a dává přehled o využívaných střídavých měničích pro různé použití. Důraz je dbán na správný sled podávaných informací a relevanci uvedených parametrů. Kapitulu tak lze brát jako uživatelskou příručku při výběru vhodného měniče.

Čtvrtá a zároveň poslední kapitola, zobrazuje realizaci a ověření střídavého měniče s funkcí měkkého rozběhu. Obsahuje finální podobu s technickým popisem jednotlivých částí a naměřené průběhy pro jednotlivé typy zátěže.

## 2 Struktura střídavých měničů napětí

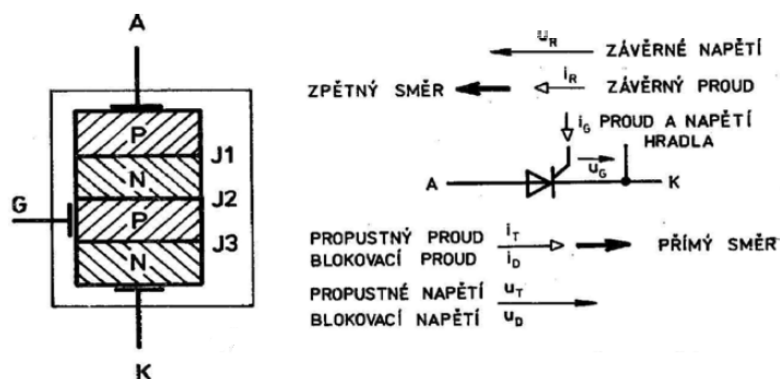
Z pohledu uživatele lze střídavý měnič definovat jako zařízení, které umožňuje plynule měnit (snižovat) střídavou hodnotu napětí přiváděnou na vstupní část měniče. V problematice signálů a soustav by se tento měnič definoval jako soustava s konstantní efektivní hodnotou spojitého signálu, jejíž výstupní efektivní hodnota signálu je zeslabena o určitý zisk a to v závislosti na vnitřních stavech. Hlavní myšlenkou této kapitoly je však zaměření na výkonovou část střídavých měničů napětí. Různé pohledy, vycházející z předešlých definic, jsou však potřebné k utvoření představy o fungování střídavého měniče.

Jelikož se z velké části všechny typy měničů skládají z polovodičových prvků, lze je terminologicky a ekvivalentně označit za polovodičové měniče. Další vlastností je i vzájemná provázanost, neboť společnými veličinami jsou vždy proud a napětí (bez ohledu na jejich průběh). Jejich kaskádním spojením bychom tak docílili „nekonečný“ okruh toku elektrické energie.

### 2.1 Tyristor

Tyristor je polovodičová součástka, jejíž vnitřní struktura je čtyřvrstvá a obsahuje tři  $PN$  přechody, založené na děrové ( $P$ ) a elektronové ( $N$ ) vodivosti. Vnější část je tvořená anodovou částí, připojenou ke krajní vrstvě  $P$  a katodovou částí, připojenou ke krajní vrstvě  $N$ . Řídící část je připojena k vrstvě  $P$  [1].

Tyristor může pracovat ve třech režimech – propustný režim, blokovací režim a závěrný režim. Uvedení tyristoru do propustného režimu se uskutečňuje přivedením proudového impulsu  $i_G$  na řídicí elektrodu. V tomto stavu protéká tyristorem propustný proud  $i_T$ , který je vyjádřen propustným napětím  $u_T$ . V případě nulového proudového impulsu dochází k blokovacímu režimu a tyristorem prochází nepatrný blokovací proud  $i_D$  za současného působícího blokovacího napětí  $u_D$  mezi anodou  $A$  a katodou  $K$ . Z propustného do závěrného režimu se tyristor uvede vlivem vnější komutace – vnější střídavé napětí dosáhne nuly a nabývá záporných hodnot vzhledem k anodě. Na tyristoru se v tomto případě vyskytuje závěrné napětí  $u_R$  a prochází jím závěrný proud  $i_R$ .

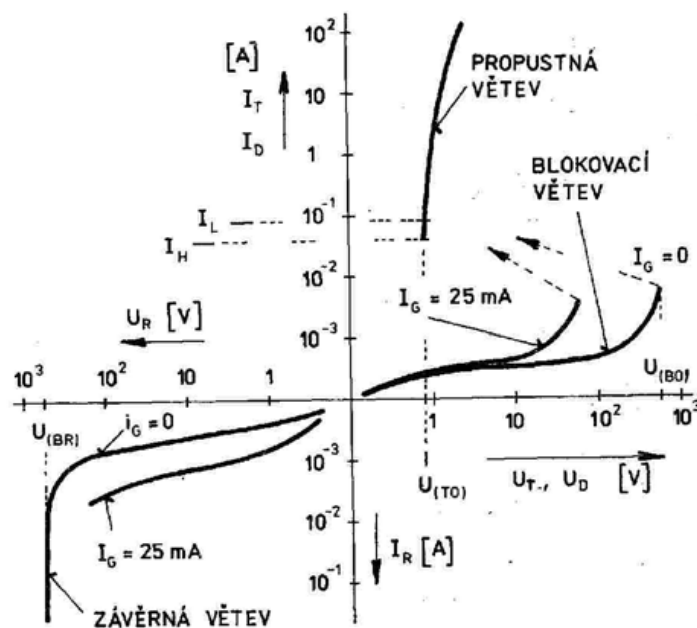


Obrázek 1 – Kompozice a schématické značení tyristoru [1]

### 2.1.1 Výstupní V-A charakteristika tyristoru

Výstupní charakteristika (Obrázek 2) udává závislost anodového proudu na anodovém napětí a graficky ji lze rozdělit do čtyř kvadrantů, z nichž první a třetí zobrazují příslušné režimy tyristoru.

V prvním kvadrantu je vyobrazen propustný (propustná větev) a blokovací režim (blokovací větev) tyristoru. Graficky lze odečíst i přechod z blokovacího režimu na propustný, a sice přivedením nenulového proudového impulsu  $i_G$  na řídící elektrodu. Hodnota impulsu je závislá na typu tyristoru a je dostupná v datovém listu součástky. Z pravidla, čím je proudový impuls větší, tím je menší mez pro spuštění blokovacího napětí  $U_{(B0)}$ . Mez spuštění  $U_{(B0)}$  je určena i pro nulový proudový impuls  $i_G = 0$ , a po jejím překročení dochází k přechodu na propustný režim. Tento způsob však není vhodný. Ke stavu, kdy dojde k přechodu z propustného do blokovacího režimu, může dojít v případě nedosáhnutí přídržného proudu  $i_L$  na anodě, který se pohybuje v řádech desetin ampér. Je-li tento proud menší, hovoříme o tzv. vratném proudu  $i_H$ , při kterém nedojde k plnému otevření tyristoru. V propustném režimu vzniká na tyristoru (stejně jako u polovodičové diody) úbytek napětí  $U_{(TO)}$  [1].

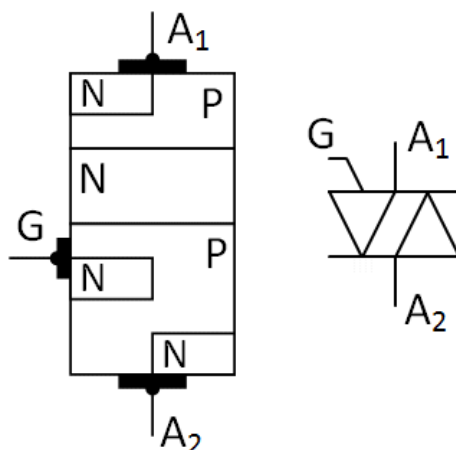


Obrázek 2 – Výstupní V-A charakteristika tyristoru [1]

Ve třetím kvadrantu je definován závěrný režim (závěrná větev). V tomto režimu se tyristor vyskytuje, je-li anodové napětí záporné. Z důvodu závěrného toku proudu  $i_R$  (v řádech tisícín ampér) není charakteristika závěrné větve nulová, stejně, jako v případě blokovací větve v prvním kvadrantu. Hlavním parametrem je zde práhové napětí  $U_{(BR)}$ , po jehož překročení dojde k destruktivnímu průrazu tyristoru [1].

## 2.2 Triak

Triak je polovodičová pětivrstvá součástka, jejíž funkce je shodná s chováním dvou antiparalelně zapojených tyristorů. Tímto lze dosáhnout sepnutí triaku v kladné i záporné amplitudě signálu. Rozlišujeme tedy pouze blokovací a propustný režim. Do propustného režimu se triak dostane přivedením proudového impulsu na řídicí elektrodu  $G$ . Hodnota proudového impulsu je u každého triaku jiná a stanovuje ji výrobce v datovém listu součástky.

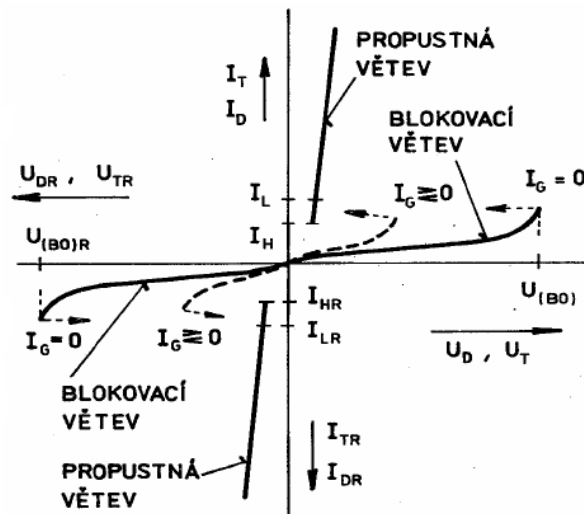


Obrázek 3 – Struktura a schématická značka triaku [2]

### 2.2.1 Výstupní V-A charakteristika triaku

Výstupní závislost napětí a proudu triaku je podobná, jako v případě tyristoru. Propustná a blokovací větev se nachází v prvním a třetím kvadrantu. Při výběru triaku se přihlíží nejčastěji na propustný proud  $i_T$  a blokovací napětí  $u_D$ . S tím souvisí i ztrátový výkon v propustném stavu  $P_{TAV}$ , pro něhož (stejně jako u tyristoru) platí vztah (2.1). Ztrátový výkon v blokovacím stavu zanedbáváme.





Obrázek 4 – Výstupní V-A charakteristika triaku [1]

Ztrátový výkon na triaku, vzniklý průchodem harmonického průběhu propustného proudu  $i_T$  a napětím  $u_T$ , je vyjádřen střední hodnotou:

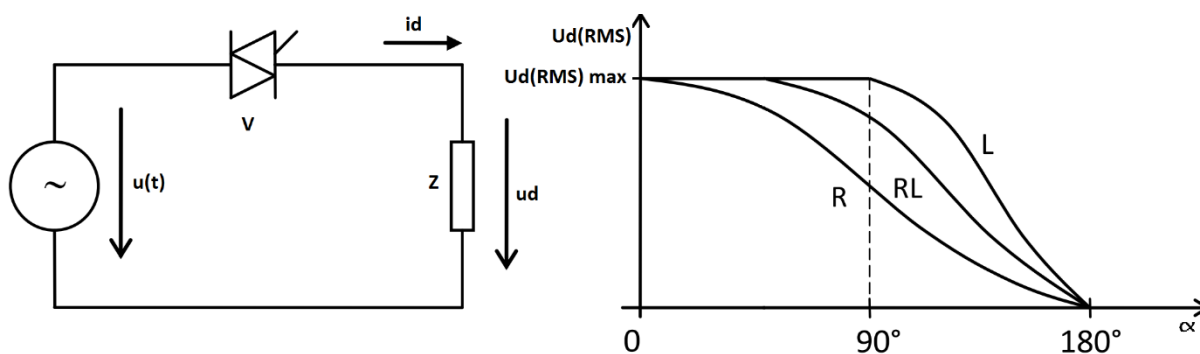
$$P_{TAV} = \frac{1}{T} \int_0^T u_T(t) \cdot i_T(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (U_{(T0)} + r_d \cdot i_T(t)) \cdot i_T(t) dt =$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T U_{(T0)} \cdot i_T(t) + r_d \cdot i_T^2(t) dt = U_{(T0)} \cdot I_{TAV} + r_d \cdot I_{TRMS}^2 \text{ [W]} \quad (2.1)$$

kde  $U_{(T0)}$  je prahové napětí a  $r_d$  dynamický (vnitřní) odpor triaku.

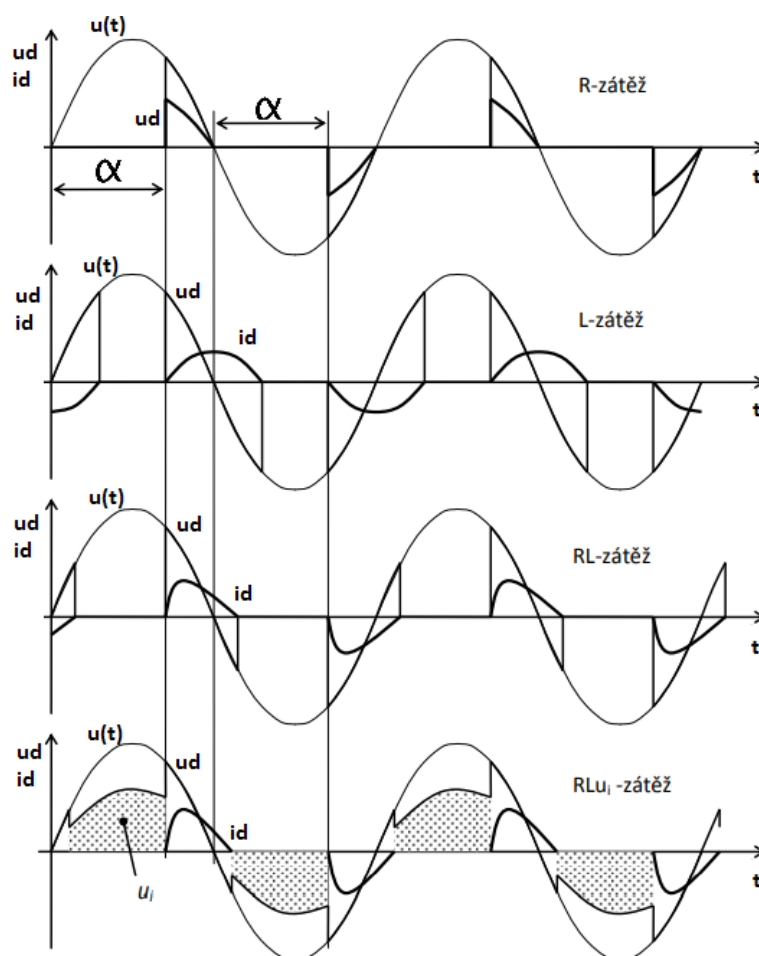
## 2.3 Jednofázové řízení příkonu

Jednofázovým řízením příkonu se již dostáváme k pravé podstatě využití střídavých měničů napětí v aplikacích. Představíme-li si dva antiparalelně zapojené tyristory (případně triak) v jedné fázi, připojené ke zdroji střídavého napětí (sinusové napětí) a zátěži, vznikne nám jednofázové řízení příkonu (Obrázek 5). Změnou úhlu řízení  $\alpha$  dojde ke změně efektivní hodnoty výstupního napětí na zátěži. Jinými slovy, čím je řídicí úhel  $\alpha$  větší, tím menší je výsledná efektivní hodnota, resp. příkon na zátěži, a zároveň i menší výsledný mechanický výkon v případě uvažovaného elektrického stroje (např. elektromotor) jako zátěže.



Obrázek 5 – Zapojení jednofázového řízení příkonu (vlevo) a řídicí charakteristika (vpravo) [3]

Teoreticky tedy lze dosáhnout u tyristoru plného otevření, resp. blokování. Ve skutečnosti to však závisí na charakteru zátěže a s tím související řídicí charakteristika střídavého měniče napětí neboli závislost efektivní hodnoty napětí  $U_{dRMS}$  zátěže na řídicím úhlu  $\alpha$  (Obrázek 5). Z ní je pak například patrné, že při čistě indukční zátěži  $L$  je rozsah řízení možný pouze v intervalu  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ .



Obrázek 6 – Průběh napětí a proudu při  $\alpha = 130^\circ$  pro různé typy zátěže [3]

Z Obrázku 6 pak lze vypočíst efektivní hodnoty pro jednotlivé zátěže:

Výslednou efektivní hodnotu napětí na odporové zátěži  $U_{dRMS}$  při sinusovém napájení vyjadřuje vztah (2.2):

$$U_{dRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_d^2(t) dt} = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_\alpha^\pi U_m^2 \cdot \sin^2 \omega t d\omega t} = \sqrt{\frac{U_m^2}{\pi} \int_\alpha^\pi \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} d\omega t} =$$

$$U_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \omega t - \frac{\sin 2\omega t}{2} \right]_\alpha^\pi} = U_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\pi}{2} \right)} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} [\text{V}] \quad (2.2)$$

kde  $U_m$  je maximální hodnota napětí střídavého sinusového zdroje  $u(t)$ .

Efektivní hodnotu čistě indukční zátěže  $U_{dRMS}$  vyjadřuje vztah (2.3):

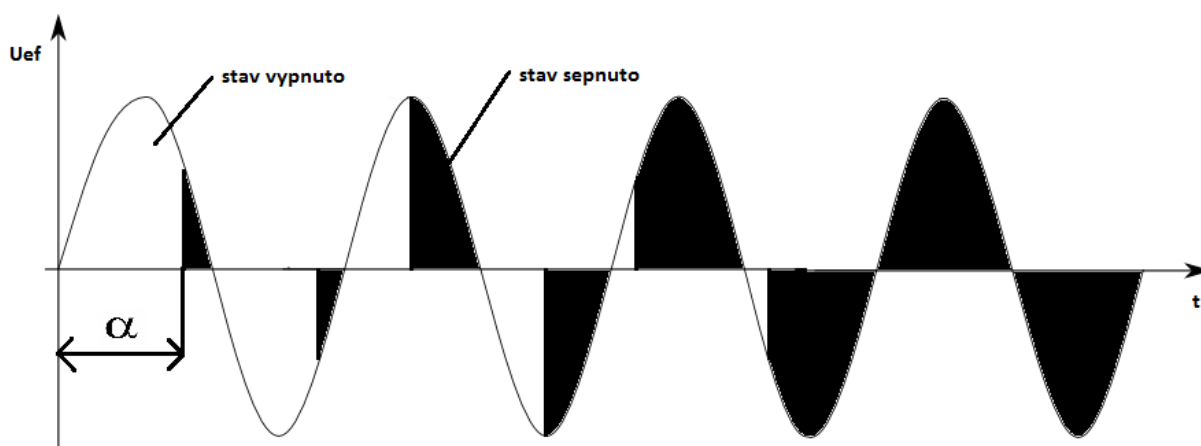
$$U_{dRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_d^2(t) dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{2 \cdot \left( 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)} [\text{V}] \quad (2.3)$$

Výpočet efektivní hodnoty pro zbylé typy zátěže, tj.  $RL$  a  $RL+U_i$ , je vzhledem k ostatním proměnným (časové konstanty, ...) těžko vyjádřitelný.

Jednofázové řízení příkonu nachází své uplatnění ve formě stmívače světla, regulátoru otáček střídavého elektromotoru, nebo ve funkci softstartéru. Právě na poslední využití bude brán největší zřetel v příštích kapitolách.

### 3 Rozbor možných variant řešení střídavého měniče napětí

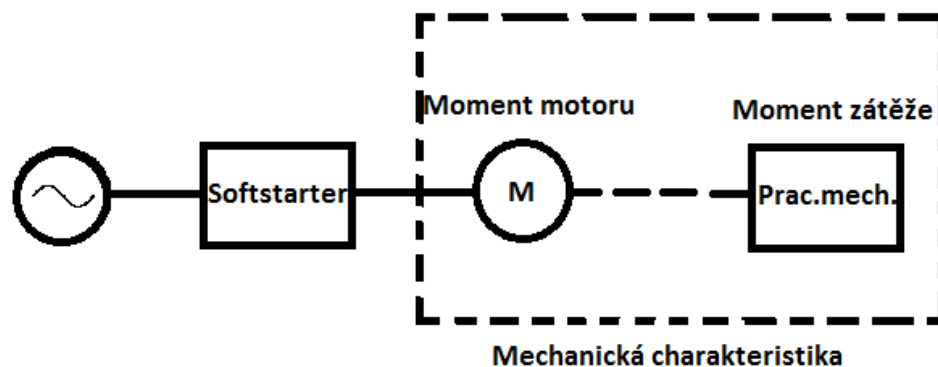
V předchozí kapitole uvádím hlavní podstatu nasazení polovodičových prvků ve střídavých měničích, zejména jejich vlastnost měnit výsledný výkon (příkon) zátěže. To za předpokladu, že zátěž je neustále připojena ve větvi obvodu. V běžné praxi jsou však tyto zátěže (spotřebiče) neustále vypínány a zapínány, např. s ohledem na prodloužení jejich životnosti. Je nutno počítat s tím, že s každým uvedením spotřebiče v činnost dochází k prvotnímu zvýšení proudu. Toto zvýšení může přesahovat až šesti-násobek jmenovitého proudu při ustáleném chodu. Problematika počátečních proudů se týká zejména indukčních motorů v jednofázové a třífázové síti. Prevencí před touto proudovou špičkou je zařazení softstartéru do obvodu spotřebiče. Princip softstartéru spočívá v postupném navyšování efektivní hodnoty napětí ve fázi/ích (viz. *Obrázek 7*).



*Obrázek 7 – Princip softstartéru*

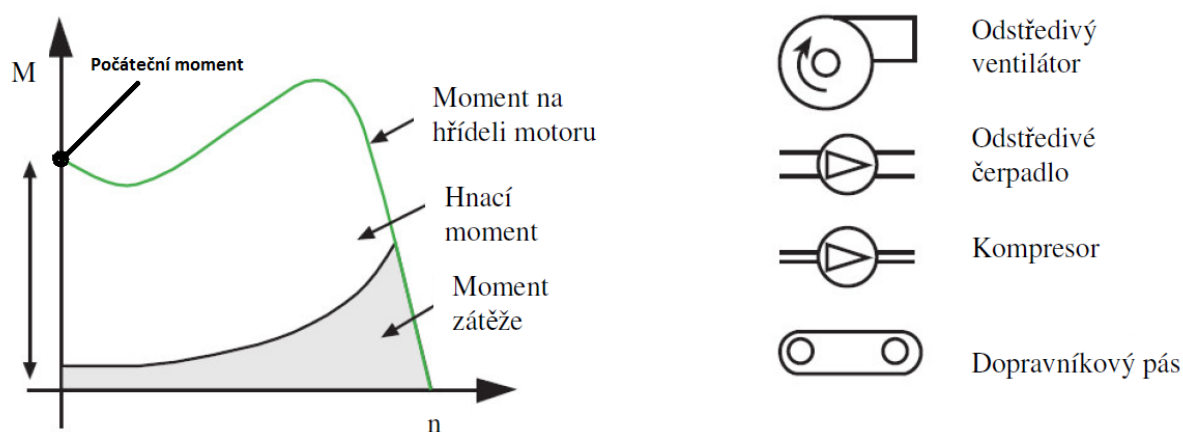
#### 3.1 Jednofázové řešení měkkého startu pro motorickou zátěž

Jako motorickou zátěž budu uvažovat střídavý indukční elektromotor, jenž je zapojen v obvodu jednofázového střídavého napětí. Rozbor je tedy vždy vztahován na mechatronický systém ve složení: napájecí střídavé napětí, mezilehlý obvod – softstartér, střídavý elektromotor a případně pracovní mechanismus (viz. *Obrázek 8*),



Obrázek 8 – Blokové schéma mechatronického systému

Při implementaci softstartéru do obvodu s motorem (jednofázový nebo třífázový obvod) je nutné odlišit, zdali je motor zatížen pracovním mechanismem, nebo pracuje naprázdno. Nejčastěji pracovní mechanismy rozlišujeme z hlediska momentu na – odstředivý ventilátor, odstředivé čerpadlo, kompresor a dopravníkový pás. U každého pracovního mechanismu je tak různý počáteční moment a moment setrvačnosti. Vždy však musí platit, že výsledný hnací moment, musí být větší, než moment zátěže [4].

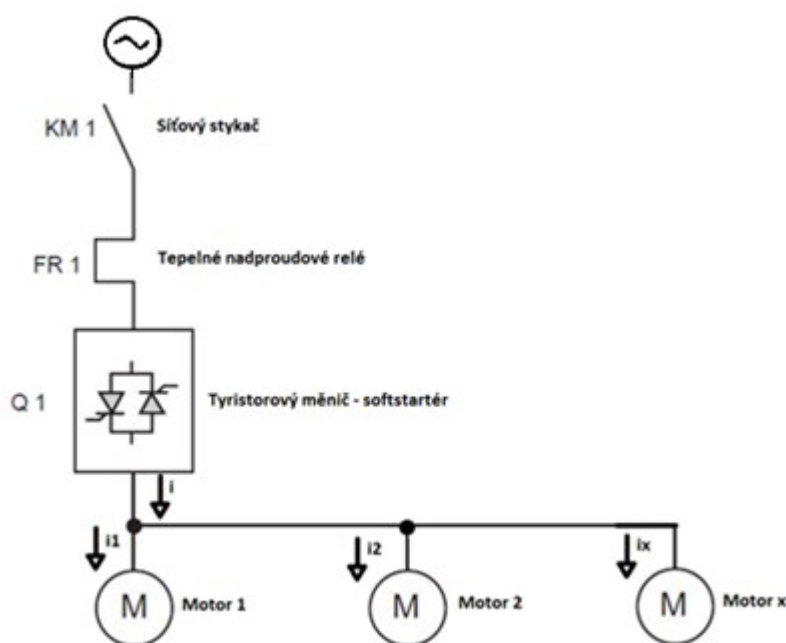


Obrázek 9 – Závislost momentu na otáčkách a označení pracovních mechanismů. [4]

### 3.1.1 Vícenásobné spouštění jednofázových motorických zátěží

#### 3.1.1.1 Paralelní spouštění

Rozbíhá-li se více motorů současně, dochází k navýšení celkové hodnoty proudu softstartérem. Při dimenzování softstartéru je tedy nutné počítat s tím, že při rozběhu dochází k několikanásobnému vzrůstu proudu motoru nad jmenovitou hodnotu. Ostatní chování motorů však nelze ovlivnit samotným softstartérem, a proto se z těchto důvodů zařazuje před každým motorem ještě příslušná ochrana proti přetížení (termistor, bimetalové relé, atd.). Tento druh spouštění se doporučuje pro motory se shodným výkonem. Méně výkonné motory mají z pravidla větší odpor statorového vinutí a jejich rozběh je doprovázen větším napětím. Při rozběhu rozdílně výkonných motorů by tak mohlo dojít k nedosažení točivého momentu u méně výkonného motoru [5]. Paralelní spouštění se nejčastěji realizuje u třífázových motorů. Uváděnou problematiku budu však prezentovat na jednofázovém zapojení.



Obrázek 10 – Zjednodušené schéma zapojení pro paralelní spouštění motorů [4]

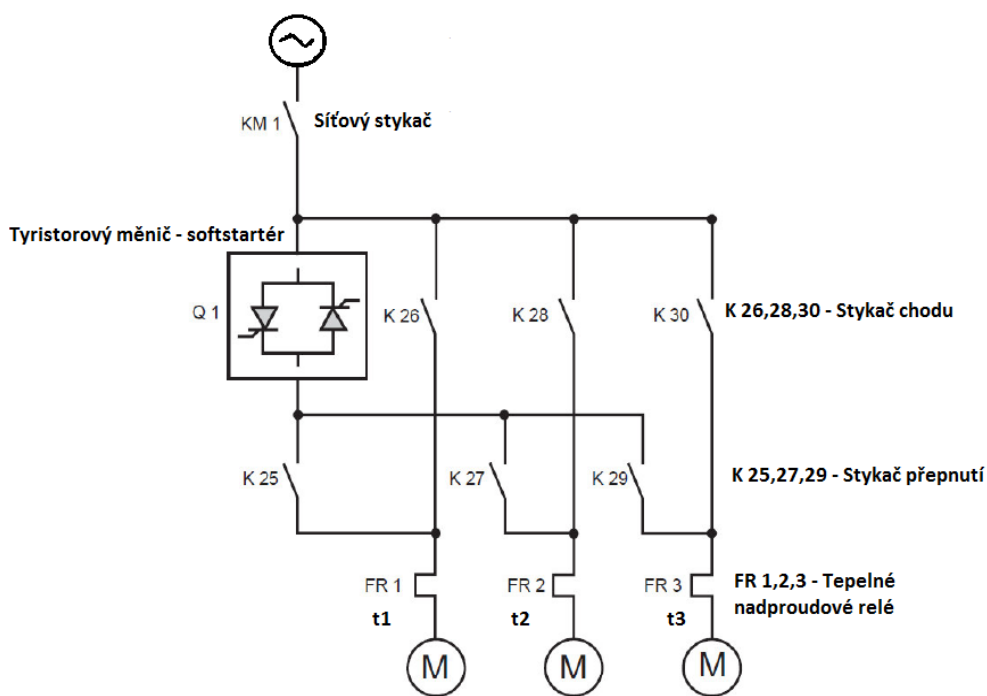
Z Obrázku 10 je patrné, že celkový proud  $i$ , je dán součtem dílčích proudů vstupujících do jednotlivých motorů:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) + \dots i_x(t) \text{ [A]} \quad (3.1)$$

#### 3.1.1.2 Kaskádní spouštění

Kaskádní spouštění se využívá při postupném rozběhu jednotlivých motorů v jednotlivých časech. Oproti předešlému způsobu zde dochází k navýšení celkového času rozběhu  $t_{cr}$ , vyjádřeným součtem dílčích časů rozběhů jednotlivých motorů (vztah 3.1). Při výběru vhodného softstartéru je nutné

dbát na počáteční záběrný proud motoru. Mají-li rozbíhané motory odlišné parametry, zejména jmenovitý proud, dimenzuje se softstartér na motor s nejvyšším jmenovitým proudem, tj. na motor s nejvyšším rozběhovým proudem.



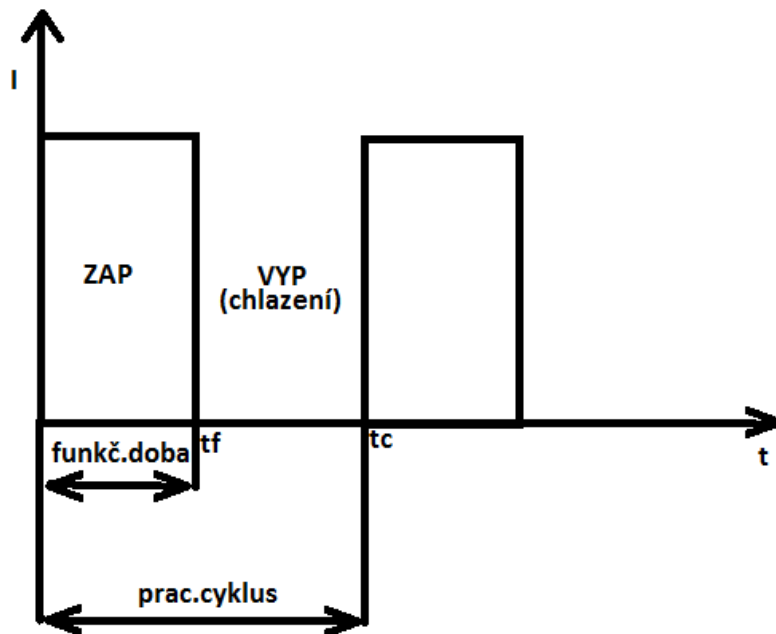
Obrázek 11 – Zjednodušené schéma zapojení pro kaskádní spouštění motorů [4]

$$t_{cr} = \sum_{x=1}^{\infty} t_x \text{ [s]} \quad (3.2)$$

Funkce postupného spouštění motorů je patrná z *Obrázku 11*. Stykače přepnutí *K 25*, *K 27*, *K 29* slouží k prvotnímu rozběhu motorů pomocí připojeného softstartéru. Doba sepnutí jednotlivých stykačů se odvíjí od doby rozběhu jednotlivých motorů. V případě sepnutí všech stykačů přepnutí najednou dojde k navýšení rozběhového proudu softstartérem o násobek počtu zapojených motorů. Stykače chodu *K 26*, *K 28*, *K 30* jsou použity v případě, kdy motor již dosahuje svých jmenovitých hodnot a dojde tak k vypnutí stykače přepnutí (softstartér se odpojí). Uvedený síťový stykač *KM 1* se doporučuje zapojovat za účelem galvanického oddělení síťového napětí. Jeho funkce se využívá při reakci na tepelné nadproudové relé nebo ochranu softstartéru [4].

Dalším zohledňujícím aspektem při spouštění, je četnost spouštění softstartéru. Četnost spouštění je vyjádřena jako maximální počet startů za hodinu. Tento parametr je závislý např. na rozběhovém proudu, teplotě okolí, době rozběhu a zatěžovateli. Zatěžovatel *Z* (vztah 3.3), udává poměr mezi funkční dobou chodu softstartéru  $t_f$  vyjadřující čas rozběhu a doběhu a celkovou dobou pracovního cyklu  $t_f$  (celková doba provozu). Tento poměr má přímý vliv na míru chlazení samotného

softstartéru a je vyjádřen referenčně k počtu startů za hodinu. Z toho vyplývá, že velikost záběrného proudu (rozběhového), resp. doby rozběhu, je přímo úměrná velikosti času chlazení ( $t_c - t_f$ ) [4].



Obrázek 12 – Grafické vyjádření zatěživatele  $Z$

$$Z = \frac{t_f}{t_c} \cdot 100 [\%] \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Druhy řízení výkonového prvku pro jednofázový měkký start

V této podkapitole uvedu různé druhy vnitřní topologie zapojení jednofázového softstartéru. Pro pochopení dané problematiky budu postupovat vzestupně od náročnosti zapojení. Složitější struktury budou pro lepší pochopení uváděné v blokovém schématu.

V první kapitole jsem uváděl nejčastější výkonové prvky, které se vyskytují ve většině měničů. Jejich časově proměnným spínáním docílíme proměnné hodnoty na výstupu. S tím tedy souvisí další okruh problematiky a sice, jak efektivně řídit výkonový prvek, aby nebylo potřeba zásahu do řídicího systému a byl by tak umožněn „autonomní“ režim. Řešením jsou analogové, digitální nebo kombinované obvody. Uvedená řešení se bude týkat následujících typů řízení:

- Reléové řízení pro rozběhový rezistor
- Řízení pomocí komparátoru
- PWM řízení pomocí mikroprocesoru 8051



### 3.1.2.1 Reléové řízení pro rozběhový rezistor

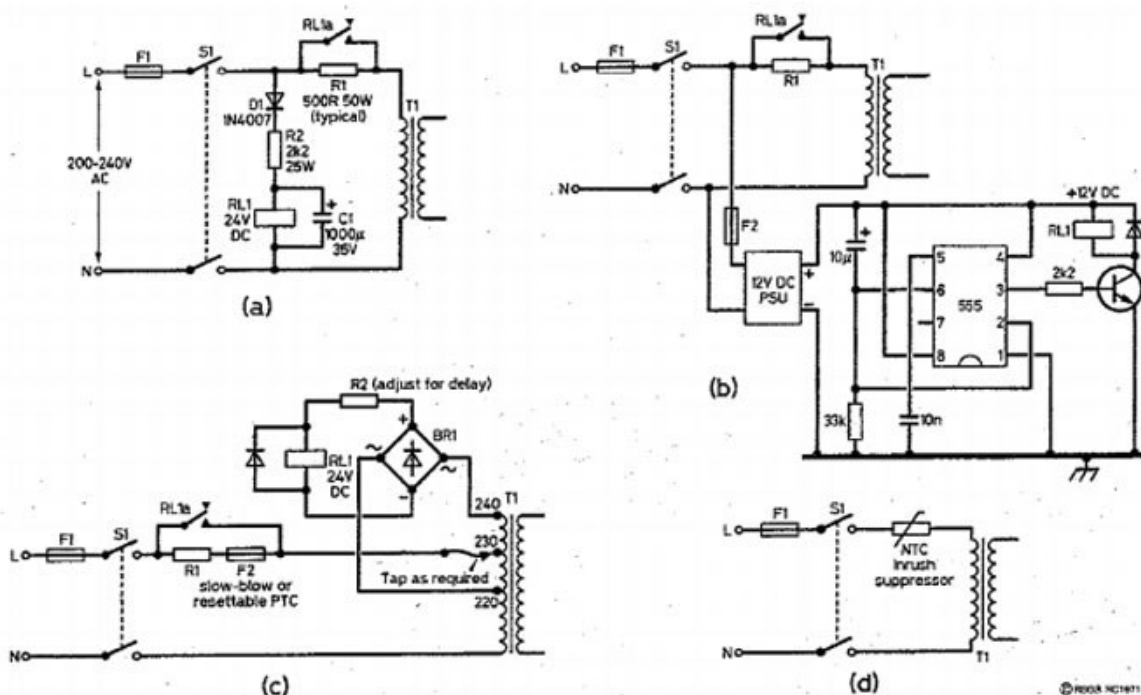
Jako první způsob je zde uveden měkký rozběh do odporu. Do kategorie střídavých měničů bychom ho asi těžko zařadili. Rozhodl jsem se ho však sem zařadit z důvodu jeho účelu použití. Představíme-li si obecnou zátěž zapojenou přímo na střídavou síť, dochází při čase, blížíciho se k nule, k počáteční špičkové hodnotě proudu. Příčinou je zde několik aspektů, a to v závislosti na druhu zátěže. Například při odporové zátěži, typicky žárovka, je při počátečním spuštění nejmenší impedance. Zákonnitě tedy vzroste proud na maximální hodnotu. Korelaci mezi teplotou a odporem vodiče (odporového drátu), popisují vztahy 3.4 a 3.5.

$$I = \frac{U}{R} \text{ [A]} \quad (3.4)$$

$$R = R_1(1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)) \text{ [}\Omega\text{]} \quad (3.5)$$

kde  $R_1$  je odpor při teplotě  $T_1$  a  $\alpha$  je teplotní součinitel elektrického odporu

Počáteční malá impedance se řeší předřadným rezistorem zapojeným v sérii se zátěží. Po dosažení jmenovitých hodnot dané zátěže se tento předřadný odpor vypojí (zkratuje). Odpojení se provádí měřením času přes zapojený časovací obvod (Obrázek 13b), a to od doby zapnutí. Další variantou je průběžné snímání napětí na svorkách zátěže (Obrázek 13a, c), přičemž po překročení určité hodnoty napětí se odpor zkratuje. Deaktivujícími prvky jsou nejčastěji relé, tranzistory a tyristory [6].

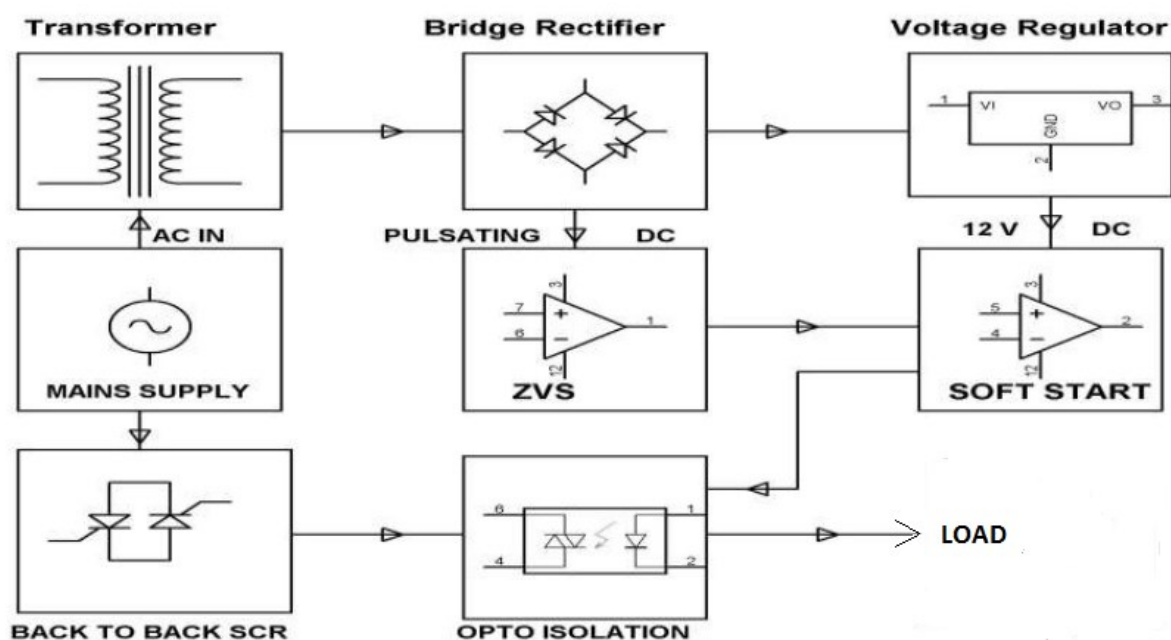


Obrázek 13 – Varianty zapojení pro řízení výkonového rezistoru [6]

Stejného chování jako v předešlém případě lze docílit *NTC* termistorem (*Obrázek 13d*). V úvahu přichází vznikající teplo, které se kumuluje v závislosti na době vedení proudu. Přidáním termistoru se záporným teplotním součinitelem (*NTC*) dochází k poklesu odporu na součástce vlivem vznikajícího tepla, které se navyšuje s přibývajícím velikostí proudu a času. Z hlediska zapojení se tato varianta jeví nejlépe, avšak z hlediska účinnosti nikoli. Účinnost měkkého startu klesá s četností zapínání a vypínání, neboť z důvodu dlouhého cyklu chladnutí termistoru není možné dosáhnout odporu součástky (předřadného odporu), jako při prvním spuštění [6].

### 3.1.2.2 Řízení pomocí komparátoru

Koncept funkce je stále stejný, a sice omezit počáteční špičkový proud. Oproti předešlému případu, kde se rozběh do odporu neuvažoval jako hladký a stupňovitý, dojde již k využití plného potenciálu výkonového polovodičového prvku. Výkonový prvek je zde zastoupen triakem, který odpovídá antiparalelně zapojeným tyristorům. Při realizaci hladkého startu je řízení triaku uzpůsobeno tak, aby na začátku časového intervalu spouštění byl řídicí úhel největší a při konci zase nejmenší. Průběh řídicího signálu se tedy mění s časem a vzhledem k jeho parametrům (obdélníkový signál, menší amplituda, stejnosměrná složka) je nutné ho galvanicky oddělit od střídavé sítě. Ve většině případů se proto uvažuje ještě stejnosměrná větev, jejíž usměrnění se provádí z hlavního napájecího napětí za účelem řízení triaku.



Obrázek 14 – Blokové schéma měkkého startu pro jednofázovou zátěž [7]

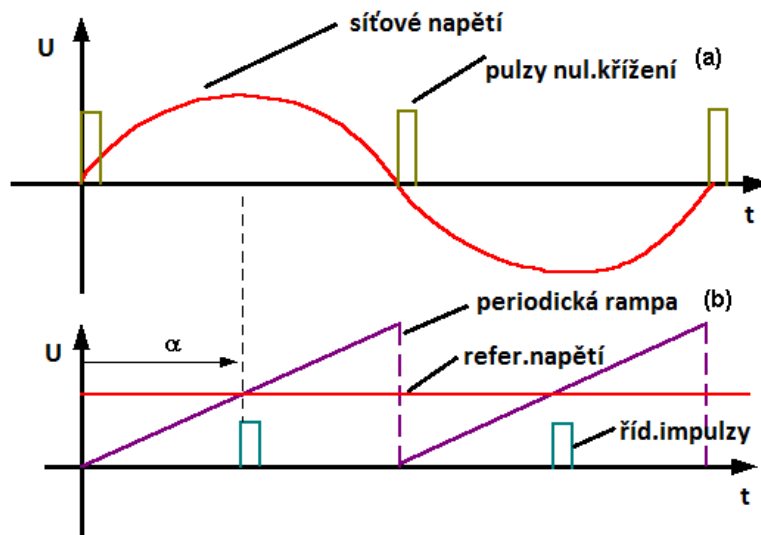
V následujících odstavcích budou popsány funkce jednotlivých komponentů, obsažených v *Obrázku 14*.

Z hlediska topologie se výše uvedené blokové schéma dělí na 2 okruhy: vysokonapěťový a nízkonapěťový. Jejich vzájemné galvanické oddělení zajišťuje optoizolace (*Opto Isolation*). Realizací optoizolace je optoizolátor, jehož funkce je založena na přivedeném světle, pomocí kterého dojde k přenosu elektrických signálů mezi dvěma izolovanými obvody. Jinými slovy, slouží jako prevence před působením vysokého napětí na systém, který přejímá signál [7].

Jako začátek pracovního okruhu (vysokonapěťového) můžeme označit střídavý napájecí zdroj (*Mains Supply*), jehož průběh je v ideálním případě sinusový. Dalším segmentem je výkonový triak (*Back to Back SCR*), který lze uvést jako meziobvod, regulující napájecí napětí do zátěže (*Load*). Na regulaci se podílí řídicí obvod, vyjádřený řídicím okruhem.

Pro řídicí okruh (nízkonapěťový) je požadováno nízké napětí. Z tohoto důvodu nejprve transformátor (*Transformer*) snižuje efektivní hodnotu síťového napětí. Na sekundárním vinutí se tedy objeví sinusový signál s hodnotou, která je vhodná pro řídicí obvod. Ten je poté dvoupulzním usměrňovačem (*Bridge Rectifier*) rozložen na kladné půlvlny. Vznikne tak pulzní signál, popsáný vztahem 1.1. Pulzního průběhu se využívá pro generování řídicích pulzů do triaku.

Řídicí impulzy (obdélníkový průběh) jsou synchronizovány s průběhem pulzů z usměrňovače (*Zero Voltage Switching = ZVS*). Princip spočívá ve využití pulzů nulového křížení. Tyto pulzy jsou přítomny v případě, kdy zkoumané napětí (pulzní napětí z usměrňovače) nabývá nulové hodnoty. Pulzy nulového křížení jsou vázány na průběh periodické rampy, kterou si lze představit jako pilovitý signál, vzniklý lineárním nabíjením kondenzátoru přes integrátor. V případě nulového křížení se tedy kondenzátor vybíjí (zkrat pomocí spínacího prvku, např. *MOSFET*), a při nenulové hodnotě zase nabíjí. Tato periodická rampa se porovnává s referenčním napětím pomocí komparátoru. Na základě porovnání komparátor generuje řídicí impulzy do triaku. Pokud je referenční napětí blízké nule, je řídicí úhel  $\alpha$  velmi malý (velká efektivní hodnota na výstupu triaku). V opačném případě se  $\alpha$  blíží k maximální hodnotě [8].



Obrázek 15 – Princip spínání nulového napětí [8]

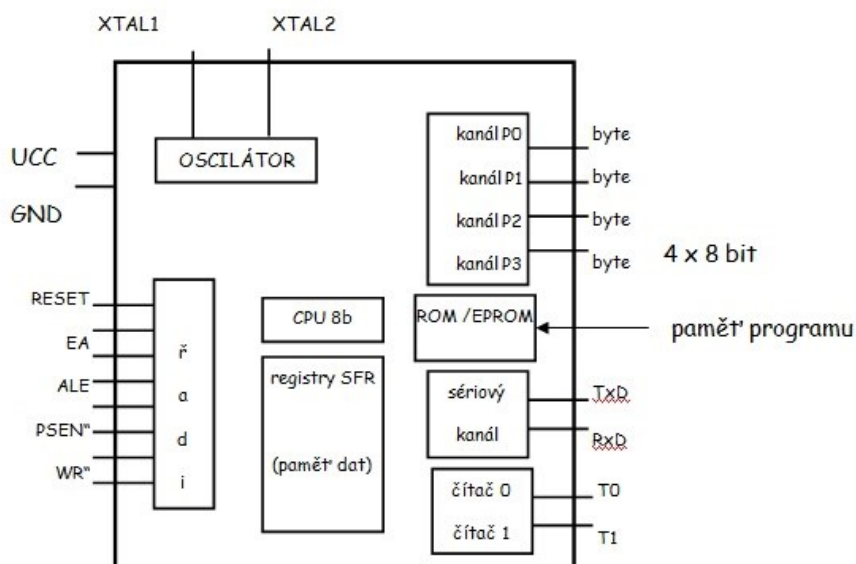
Přidruženou částí usměrňovače je filtrační kondenzátor, který zajistí redukcí pulzního průběhu napětí (vyhlazení). To je dále zpracováno ve stabilizátoru napětí, který může být zjednodušeně vyjádřen i jako zapojení rezistoru se zenerovou diodou. Výstupem ze stabilizátoru je stejnosměrné napětí o velikosti 12 V, které je dále využíváno pro napájení integrovaných obvodů [7].

### 3.1.2.3 PWM řízení pomocí mikroprocesoru 8051

Je-li požadavek vytvořit regulátor napětí s možností měkkého startu, je ve většině případů ve středu zájmu vytvořit obvod s vyšší mírou integrace na rozměr dané plochy. V praxi to znamená ekvivalentně nahradit potřebnou funkci malým počtem součástek. Řešením jsou číslicové a mikroprocesorové obvody, doplněné v malé míře analogovými prvky.

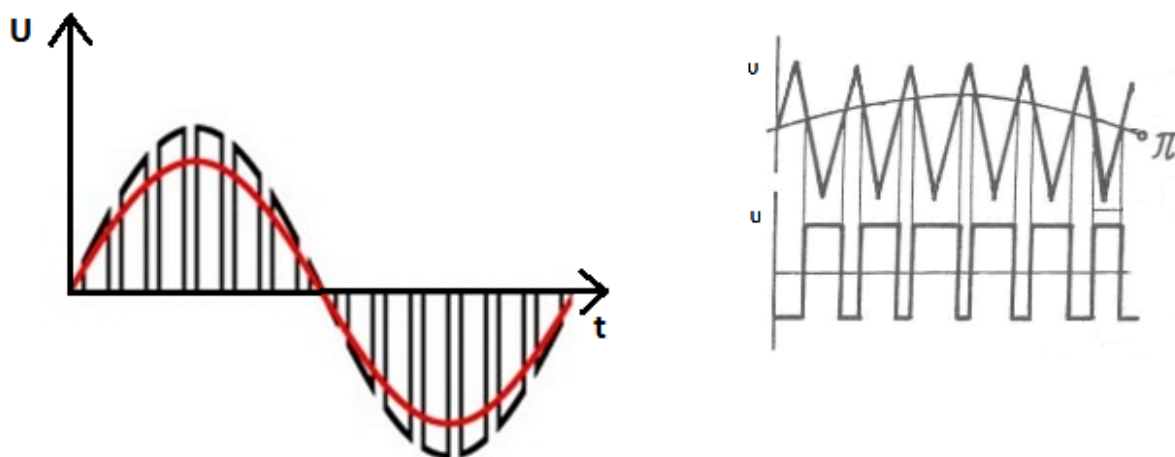
U tohoto druhu řízení, se bude využívat zapojení s mikroprocesorem řady 8051. Další odlišností je zde absence triaku nebo tyristoru. Hlavní regulační funkci tady zastává *IGBT* tranzistor (popřípadě *MOSFET*).

Mikroprocesor 8051 využívá Harvardskou architekturu, čemuž odpovídá separace datové a programové paměti. Kapacita vnitřní paměti *RAM* činí 128 bytů, přičemž obsažené registry jsou osmibitové. Pro komunikaci s vnějšími perifériemi jsou k dispozici 4 vstupně/výstupní porty (*P0 – P3*). Mikroprocesor pracuje s frekvenční rychlostí  $1,2 \div 33$  MHz, s možností připojení vnějšího oscilátoru (na svorky *XTAL*). Implementované čítače/časovače analyzují vnější, resp. vnitřní signál a jejich kombinací lze zvolit příslušným bitem ve speciálním registru. Režim časovače se nejčastěji používá pro vytvoření časového intervalu nebo zpoždění. Jejich kapacita může být až 16-ti bitová [9]. Vnitřní struktura mikroprocesoru 8051 je zobrazena na *Obrázku 16*.



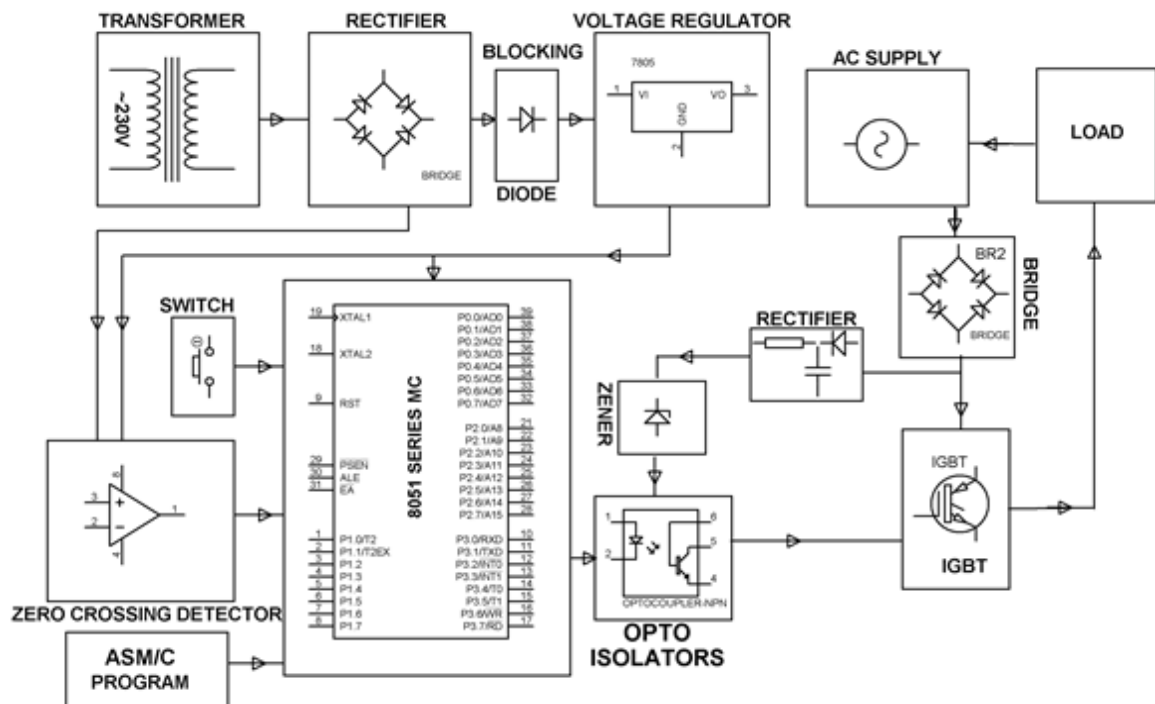
Obrázek 16 – Blokové schéma vnitřní struktury mikroprocesoru 8051 [9]

Princip uváděné regulace napětí na výstupu měniče vychází z metod řízení obecného střídače. Jedna z těchto metod se nazývá šířkově pulzní. Toto řízení se provádí střídavým zapínáním a vypínáním zdroje napětí na zátěž, a to několikrát za jmenovitou periodu výstupního napětí. Střídavým zapínáním a vypínáním se mění okamžitá střední hodnota obdélníkového signálu. Tímto způsobem dosáhneme požadovaného tvaru (sinusového) na výstupu zátěže (*Obrázek 17*). Ve skutečnosti je však tvar signálu deformovaný, z důvodu parazitních harmonických [10].



*Obrázek 17 – Ideální vykreslení sinusového signálu a způsob modulace výst. napětí [11][10]*

Jeden ze způsobů, jak modulovat výstupní signál na požadovaný průběh, je komparace trojúhelníkového signálu se sinusovým signálem (*Obrázek 17*). Tento způsob je využíván v tyristorových střídačích, kde zmíněnou komparaci zajistíme jejich řízení. Vhodným rozložením pulzů, vytvářejících výstupní napětí, minimalizujeme harmonické složky. Dalším faktorem je modulační kmitočet, jehož navýšením dojde k lepšímu vykreslení výstupního signálu [10].

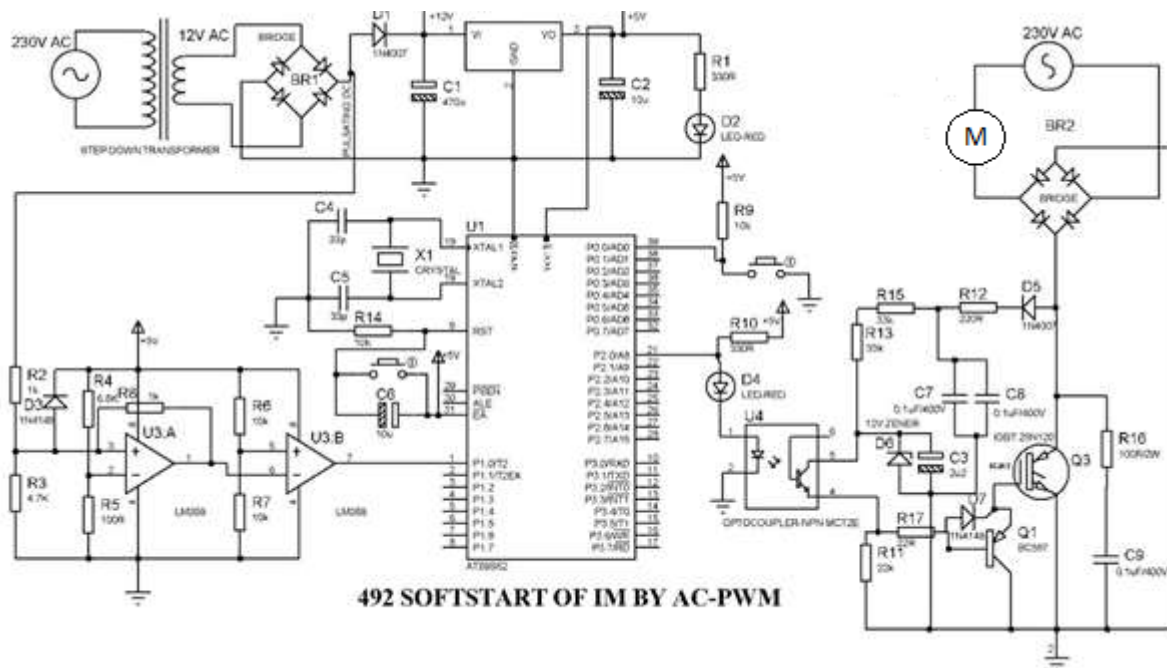


Obrázek 18 – Blokové schéma PWM řízení pomocí mikroprocesoru 8051 [11]

Blokové schéma na Obrázku 18 je rozloženo opět na nízkonapěťovou část a vysokonapěťovou část. Do nízkonapěťové části se řadí napájení mikroprocesoru (standardně 3,3 V), ovládání spínacího prvku (vyznačen *IGBT* tranzistor) a obvod pro detekci nulového napětí (*Zero Crossing Detector*), jehož funkce byla popsána v řízení pomocí komparátoru. Součástí zapojení je i spínač (*Switch*), jehož spínáním dochází k regulaci příkonu do zátěže.

Vysokonapěťová část je zde zastoupena střídavým napájecím zdrojem připojeným k zátěži. Nízkonapěťová část a vysokonapěťová část jsou od sebe odděleny optoizolátorem.

Samotná regulace příkonu zátěže spočívá v zapojení usměrňovacího můstku do série se zátěží. Na střídavé straně usměrňovače je tedy sériově připojen střídavý zdroj napětí se zátěží a na usměrňované straně zase výkonový tranzistor. Jakmile je tranzistor vypnutý, neprotéká jím proud a ve stejném případě nemůže protékat proud ani zátěží. V opačném případě – tranzistor je zapnutý, dochází k iniciaci zátěže. Změnou střídavé *PWM* signálu, která řídí tranzistor, je regulován příkon do zátěže. Řízení tranzistoru je synchronizováno s obvodem pro detekci nulového napětí [11]. Kompletní schéma zapojení obvodu je na Obrázku 19.



Obrázek 19 – Kompletní schéma zapojení PWM řízení pomocí mikroprocesoru 8051 [12]

### 3.2 Třífázové řešení měkkého startu pro motorickou zátěž

Ve druhé polovině kapitoly nelze vynechat problematiku regulace střídavého napětí (spouštění) v třífázové soustavě. Snad i proto, že většina průmyslových motorů (omezíme-li se na motorickou zátěž) je primárně využívána ve výrobních procesech, kde z důvodu efektivity práce, tj. menší spotřeba výrobní energie na úkor kvantity a kvality výrobků, je využíváno trojfázové sítě.

Mezi motivující praktické srovnání využití trojfázové sítě a jednofázové sítě lze uvést takto:

- Jeden třífázový transformátor (nebo generátor) se výkonově rovná třem využitým jednofázovým transformátorům (generátorům);
- Menší ztráty při přenosu energie třífázovým vedením, než při přenosu stejného výkonu jednofázovým vedením;
- Použití třífázové sítě pro asynchronní motory vyšších výkonů.

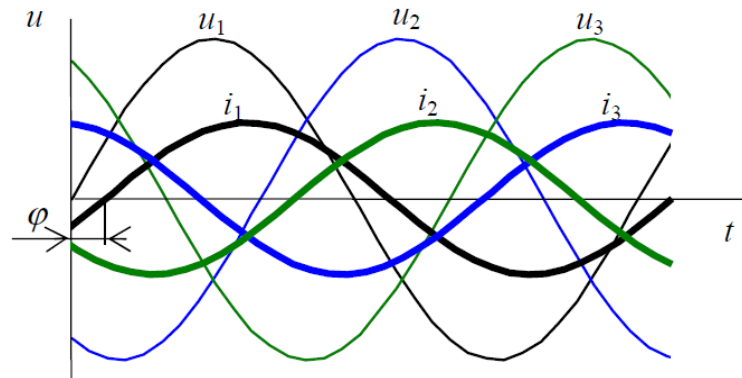
Před analýzou regulace příkonu spotřebiče v třífázové síti je zapotřebí si vytvořit ucelený pohled na obecný třífázový obvod. K tomu provedu stručný rozbor.

Uvažujeme-li ideální model třífázové soustavy, mluvíme o souměrné soustavě, jejíž tři fáze ( $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ ) mají odpovídající charakteristické vlastnosti, tzn. stejná amplituda, stejný kmitočet a vzájemný fázový posun je  $120^\circ$  (vztah 3.6). Pro proudy ve fázích v tomto případě platí stejný výrok, avšak vzhledem k napětí jsou vždy posunuty o  $\varphi$  (Obrázek 20). V jistých případech může (ale nemusí) být do soustavy zahrnut ještě nulový vodič  $N$  (čtyřvodičová soustava) [13].



$$\begin{aligned}
u_1(t) &= U_m \cdot \sin(\omega t) & i_1(t) &= I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\
u_2(t) &= U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) & i_2(t) &= I_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2}{3}\pi\right) \text{ [V, A]} \quad (3.6) \\
u_3(t) &= U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) & i_3(t) &= I_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{4}{3}\pi\right)
\end{aligned}$$

kde  $U_m$  ( $I_m$ ) je maximální hodnota napětí (proudu).



Obrázek 20 – Časový průběh napětí v jednotlivých fázích [13]

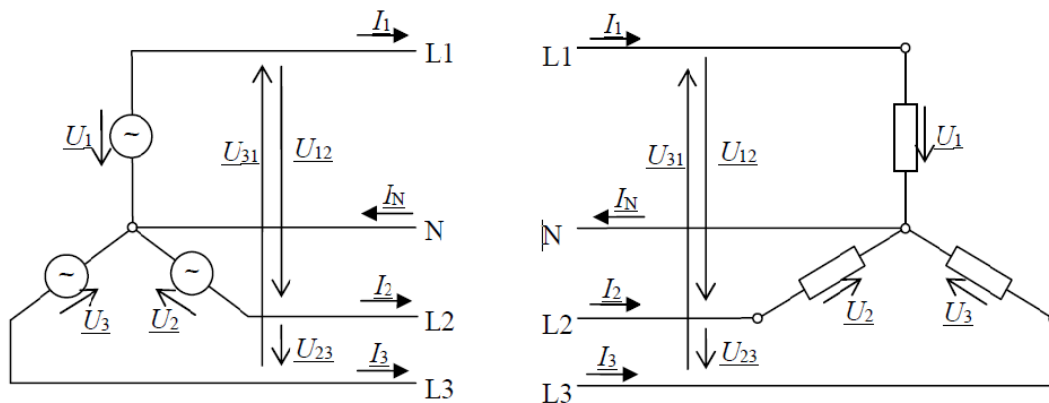
Při dosazení hodnoty za čas  $t$  v předešlých vztazích (3.6) vyjde v konečném součtu těchto tří složek (vztahů, fázorů, proudů, napětí) nulová hodnota. Z toho vyplývá, že v každém okamžiku je součet napětí v souměrné soustavě, resp. proudů, ve všech fázích nulový (vztah 3.7) [13].

$$i = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) = 0 \text{ [A]} \quad (3.7)$$

Nutnou zmínkou jsou i možnosti zapojení spotřebiče a zdroje v třífázové soustavě. V elektrotechnice rozlišujeme zapojení do hvězdy ( $Y$ ), nebo do trojúhelníku ( $D$ ).

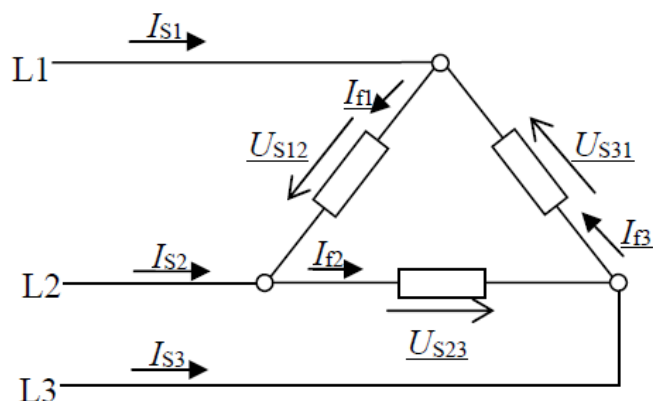
U zapojení spotřebiče do hvězdy ( $Y$ ) je na každé fázi zvlášť efektivní napětí 230 V. Jedná-li se o souměrnou soustavu (ze strany zdroje a zátěže), pak fázové proudy  $I_1$ ,  $I_2$  a  $I_3$  vykazují stejnou velikost a mají vzájemný fázový posun o  $120^\circ$ . Jejich součet je tedy nulový a nulovým vodičem  $N$  neprotéká žádný proud  $I_N = 0$  [13].





Obrázek 21 – Zapojení zdroje a spotřebiče do hvězdy [13]

Při zapojení spotřebiče do trojúhelníku, odpadá zapojení s nulovým vodičem N a jednotlivé fáze spotřebiče se rovnají sdruženému napětí  $U_s$ . Ve výsledku tedy  $U = U_s = U_{s\text{spotř.}} = 400 \text{ V}$ . Fázemi spotřebiče v tomto zapojení teče sdružený proud  $I_s$ , vyjádřený vzhledem k fázovému proudu jako  $I_s = \sqrt{3} \cdot I_f$ . Z praktického hlediska musí být tedy spotřebič dimenzován na efektivní hodnotu napětí 400 V v případě, že má být použit v zapojení do trojúhelníku [13].

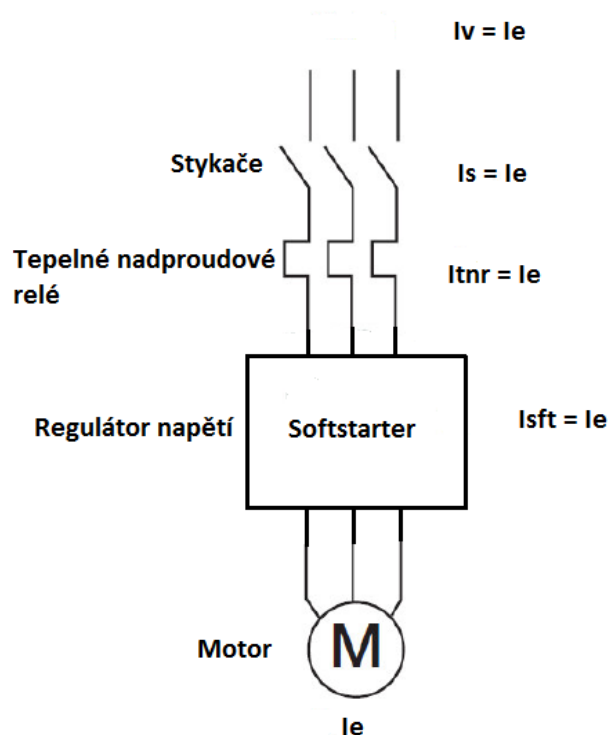


Obrázek 22 – Zapojení spotřebiče do trojúhelníku [14]

### 3.2.1 Metody připojení softstartéru k motorické zátěži

#### 3.2.1.1 Sériově s motorem (In-Line)

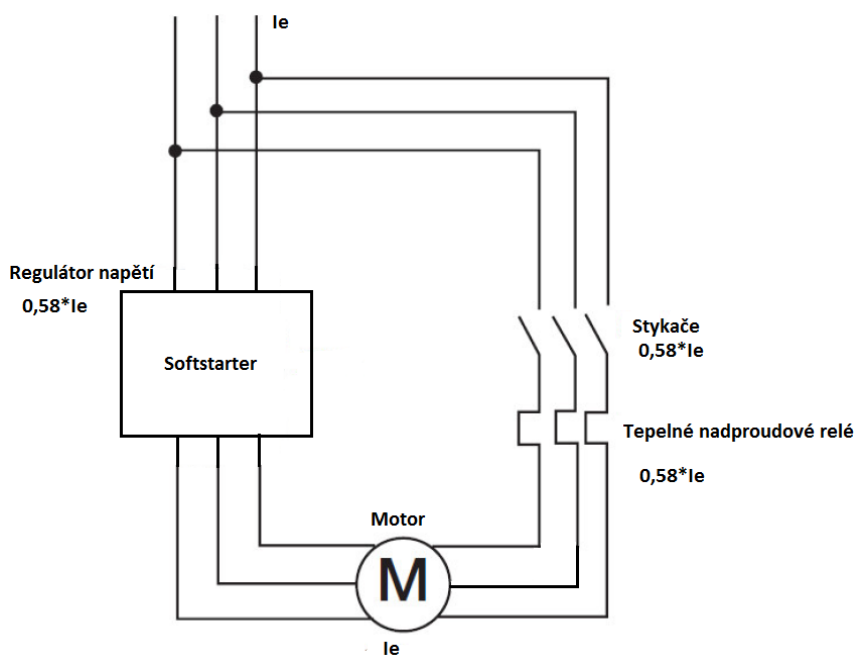
Nejběžnějším a nejlehčím způsobem zapojení je připojení softstartéru sériově k motoru. Přidruženými částmi zapojení jsou tepelné nadproudové relé a síťové stykače, které jsou spojeny taktéž sériově k softstartéru. Při dimenzování regulátoru (softstartéru) a ochran se vychází ze jmenovitého proudu motoru, tj.  $I_V = I_S = I_{TNR} = I_{SFT} = I_E$  (Obrázek 23) [4]. Výhodou tohoto zapojení je úspora počtu vodičů (3 vodiče).



Obrázek 23 – Zapojení softstartéru In-Line [4]

### 3.2.1.2 Paralelně s motorem (Inside-Delta)

Dalším způsobem zapojení je uvnitř trojúhelníku neboli Inside-Delta. Tímto lze efektivněji nahradit stále používané spouštění hvězda – trojúhelník ( $Y/D$ ). Při dimenzování softstartéru se může v tomto případě přihlídnout na nižší proud, než je jmenovitý proud motoru. Nižším proudem se rozumí 58% ze jmenovitého proudu  $I_e$ . Hlavní výhodou je tedy použití softstartéru s nižším jmenovitým proudem, čemuž odpovídají i nižší cenové náklady. Stejně pravidlo lze aplikovat i na návrh ochran (tepelné nadproudové relé, stykače). Nevýhodou je, že v zapojení je dvounásobný počet vodičů (6 vodičů) [4].



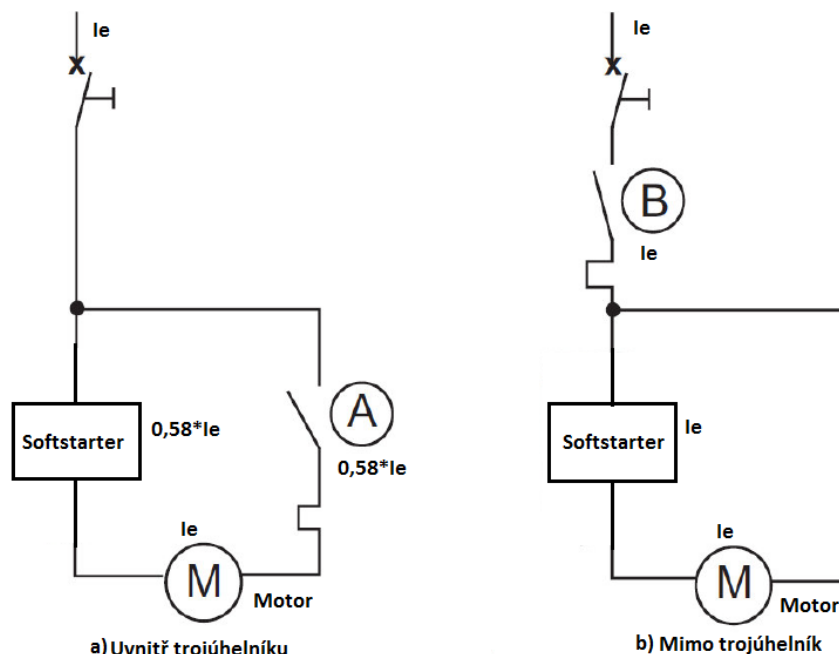
Obrázek 24 – Zapojení softstartéru Inside-Delta [4]

### Varianty zapojení síťového stykače

Síťové stykače bývají nedílnou součástí rozsáhlejších obvodů a jinak tomu není ani v případě spouštění motorů, kde zastupuje funkci ochrany před přetížením nebo poruchou. Jejich správným umístěním můžeme ovlivnit parametr zatěžovacího proudu. Zejména v případě, kdy zvolíme metodu připojení softstartéru v trojúhelníku (Inside-Delta). Pak můžeme připojit stykač dvojím způsobem – uvnitř trojúhelníku nebo mimo trojúhelník. Obě možnosti mají však stejnou funkci, a sice přerušení napájení motoru.

Síťový stykač, zapojený uvnitř trojúhelníku, lze dimenzovat na 58% jmenovitého proudu motoru  $I_E$  (Obrázek 25a) [4]. Po jeho vyřazení je však motor stále považován za připojený (připojená větev se softstartérem) a deaktivovaný stykač je stále pod napětím.

Síťový stykač, umístěný mimo trojúhelník, zajistí úplné vypnutí větve s motorem a jeho proudové dimenzování se odvíjí od jmenovitého proudu motoru (Obrázek 25b) [4].



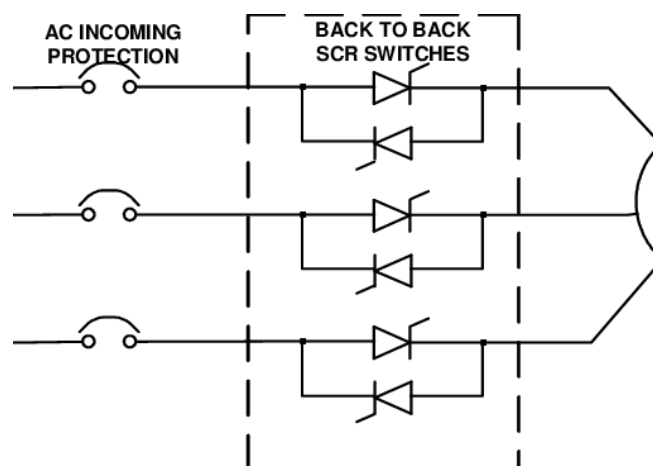
Obrázek 25 – Zapojení sít'ového stykače a) Uvnitř trojúhelníku b) Mimo trojúhelník [5]

### 3.2.2 Třífázové řízení napětí pro třífázovou motorickou zátěž

V úvodní části byl uveden rozbor obecné třífázové soustavy se spotřebičem. V této podkapitole budou uvedeny možnosti řízení třífázové motorické zátěže. Řešení bude vycházet z použití tyristorů, jako hlavními prvky pro regulaci střídavého napětí, ale i z použití ostatních polovodičových prvků, zejména *MOSFET* tranzistorů. Princip funkce uvedených řízení bude z velké části vycházet z jednofázového řízení, které bylo rozebíráno v problematice jednofázové regulace.

#### 3.2.2.1 Řízení pomocí komparátoru

U tohoto typu řízení je regulace prováděna pomocí antiparalelně spojených tyristorů v každé fázi vedení. V součtu to tedy znamená 6 tyristorů (dva na každou fázi) na třífázovou síť, jak ukazuje Obrázek 26.



Obrázek 26 – Třífázový softstartér s 6-ti tyristory [14]

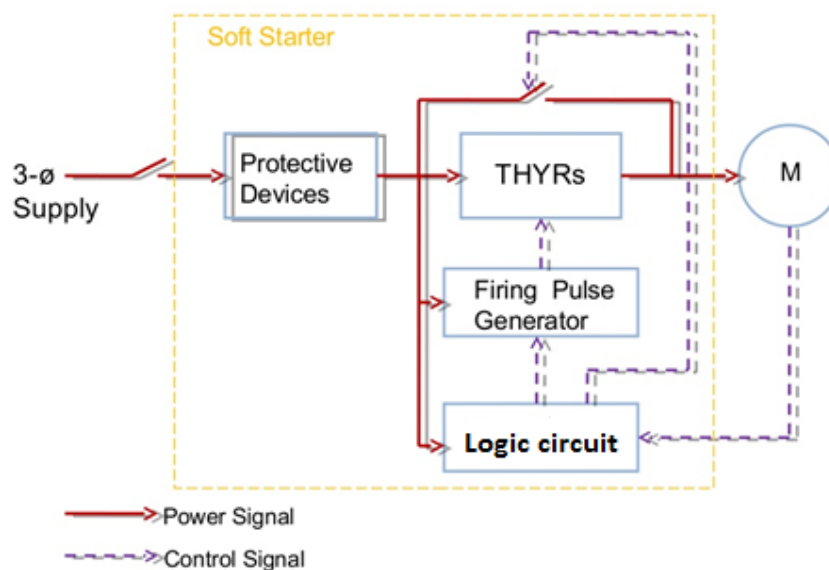
Na *Obrázku 26* vidíme pouze vnější topologii regulace napětí, avšak všechny obsažené tyristory potřebují řídicí část, která stejně jako u jednofázové, pracuje s podstatně nižším napětím. Řídicí část bývá zastoupena mikrokontroléry, logickými obvody, analogovými obvody, nebo kombinací všech uvedených.

Z hlediska řídicí části, rozlišujeme 2 typy řízení:

**Řízení v otevřené smyčce** – Počáteční napětí se odvíjí pouze od nastavené časové rampy a nikoliv od aktuální hodnoty proudu nebo otáček motoru. Úhel otevření tyristoru je závislý na čase. V čase nula odpovídá úhel otevření tyristoru  $180^\circ$  a v posledním okamžiku  $0^\circ$ . Tento typ řízení není příliš efektivní, neboť nedochází k plnohodnotnému zrychlení motoru [15].

**Řízení v uzavřené smyčce** – Časová rampa se mění v závislosti na okamžitých hodnotách motoru. Snímače a čidla sledují výstupní parametry motoru (proud, otáčky, atd.) a posílají informace do řídicího obvodu, který na základě podaných informací upraví rozjezdovou rampu, popřípadě zastaví celý chod motoru [15].

Zjednodušené blokové schéma třífázového řízení tyristorového měniče je na *Obrázku 27*.



Obrázek 27 – Blokové schéma řízení tyristorového měniče [16]

V níže zkoumaném systému (Obrázek 28) jsou řídicí části zastoupené logické obvody, vyjádřené komparátory pro vytvoření úrovně napěťové rampy a jedním optoizolátorem k vytvoření konečných pulzů na tyristorové hradlo a ke galvanickému oddělení řídicí a vysokonapěťové části [15].

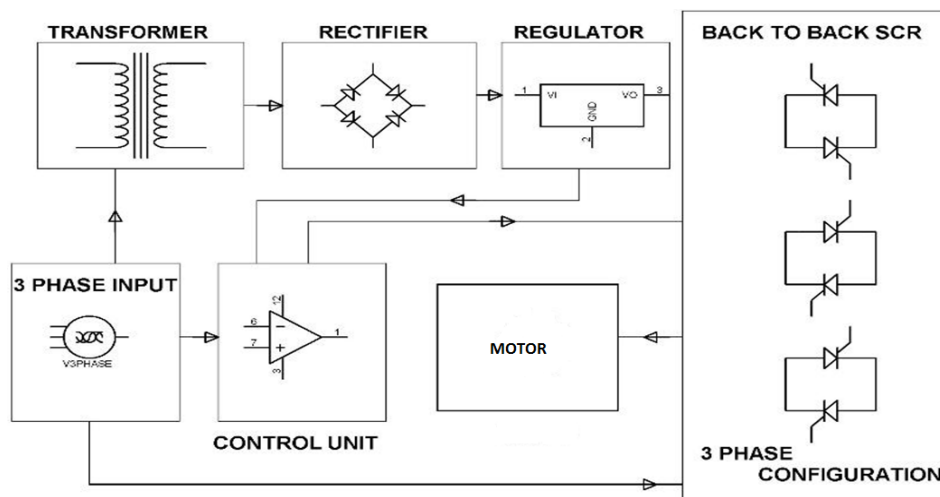
První komparátor vytváří požadovanou úroveň napětí, přičemž na jeho invertující vstup je přivedeno konstantní (stejnoseměrné) napětí a na druhý (neinvertující) vstup je přivedeno napětí z kondenzátoru, které bývá nejčastěji připojeno na kolektor *NPN* tranzistoru. Výstupní úroveň napětí dosahuje vysoké nebo nízké úrovně, a to právě v závislosti na nabíjení nebo vybíjení kondenzátoru [15].

Výstupní napětí z prvního komparátoru je přiváděno dále na neinvertující vstup jiného komparátoru, na jehož invertujícím vstupu je rampové napětí. Rampové napětí lze nejdostupněji vytvořit opět pomocí komparátoru, který porovnává stejnosměrné napětí s pulzujícím (např. z usměrňovače). Tím generuje nulový referenční signál, jenž je konvertován na rampové napětí, vznikajícím nabíjením a vybíjením elektrolytického kondenzátoru [15].

Komparátor, jenž porovnává rampové a úrovně napětí (výstup z prvního komparátoru), generuje obdélníkový signál, jehož šířka se mění v závislosti na úrovni napětí. Čím je tedy úroveň napětí menší, tím je šířka pulzu větší a zároveň tím menší je zpoždění sepnutí tyristoru. Výstupní obdélníkový signál se invertuje v optoizolátoru [15].

Pro napájení logických obvodů se používá 12 V stejnosměrné napětí, které se usměrní z každé fáze zvlášť. V celém zapojení jsou tedy dohromady tři napájecí zdroje. Z každého můstkového usměrňovače vede jedna větev s pulzujícím (nefiltrovaným) napětím pro jeden vstup komparátoru a jedna větev pro konstantní (filtrované) napětí. Obě větve jsou odděleny blokující diodou. Konečné vyhlazení napětí se provádí v napěťovém stabilizátoru.

Celý proces řízení se řadí do otevřené smyčky, protože čas sepnutí tyristoru je závislý na časově proměnném rampovém napětí [15].

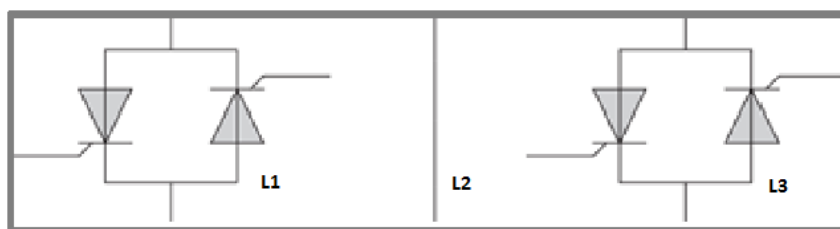


Obrázek 28 – Zjednodušené blokové schéma třífázového řízení měkkého startu [15]

### 3.2.3 Dvoufázové řízení měkkého startu pro třífázovou motorickou zátěž

Pro  $n$ -fázové tyristorové měniče je použito  $2 \cdot n$  tyristorů. Přitom vyšší počet tyristorů znamená zároveň i vyšší náklady na provoz. Za účelem snížení nákladů byla provedena analýza dvoufázového řízení pro třífázovou zátěž a zároveň se kladl důraz na stejný výkon softstartéru, jako v případě třífázového regulátoru.

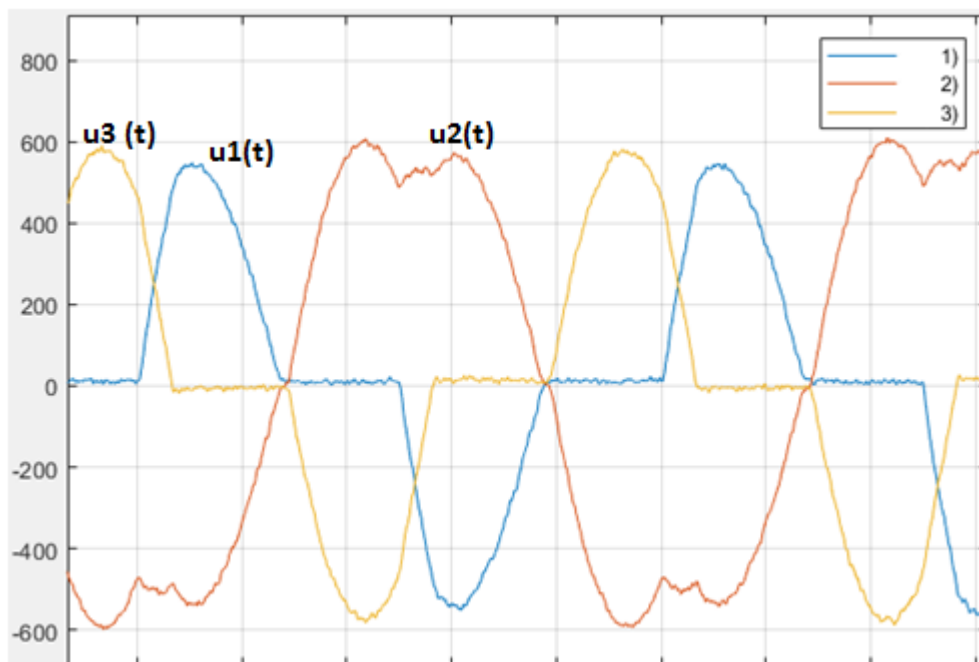
Hlavní funkcí softstartéru (dvoufázového i třífázového), coby střídavého měniče napětí, je stále stejná, a to vzestupně měnit efektivní hodnotu při spouštění motoru. Rozdíl ve funkci u obou měničů není znatelný, avšak jistou pozornost si zaslouží průběh proudů jednotlivými fázemi. Zapojení tyristorů ve dvoufázovém softstartéru je zobrazeno na Obrázku 29.



Obrázek 29 – Zapojení tyristorů ve dvoufázovém softstartéru [17]

Při aktivovaném dvoufázovém softstartéru dochází k rozdílným hodnotám proudů ve fázích. Obě řízené fáze ( $L1$  a  $L2$ ) vykazují přibližně stejnou hodnotu proudu s odchylkou maximálně 20 %. Proud neřízené fáze ( $L3$ ) však může dosahovat až o 50% větší hodnoty než u neřízených fází. Může za to i fakt, že každá fáze vede v jiný okamžik, resp. řízené fáze vedou proud vždy v určitém čase každého polovičního cyklu sinusového napájení a jejich nevodivý stav je při průchodu signálu nulou a v průběhu zpoždění řídicího úhlu, zatímco neřízená je konstantně ve vodivém stavu a poskytuje tedy

cestu pro vratný průchod proudu. Dále je nutné mít na paměti, že součet všech fázových napětí, resp. proudů, je nula, tudíž  $u_2(t) = -u_1 - u_3$  [17]. *Obrázek 30* zobrazuje průběh fázových napětí při řídicím úhlu odpovídajícímu času 5 ms (50% napětí).

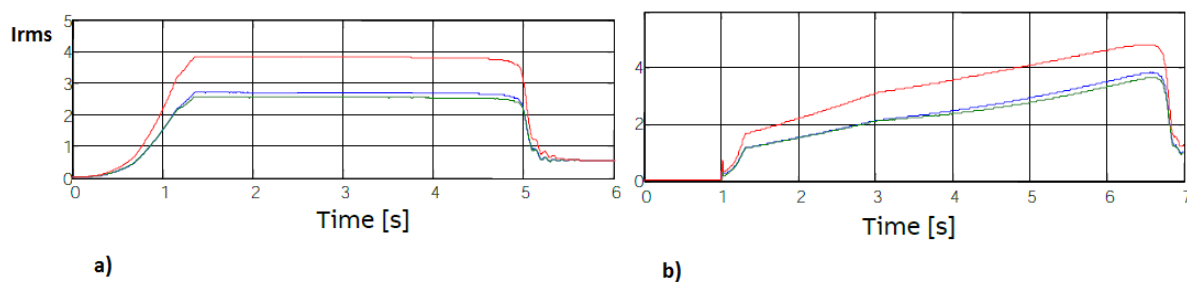


*Obrázek 30 – Průběh fázových napětí při řídicím úhlu 5ms [17]*

Proudová dysbalance může mít znatelný teplotní vliv na statorové vinutí, což by snížilo účinnost motoru. Závažnost problému však závisí na vlastnostech motoru a jeho zatížení. Z hlediska motoru se nejedná o velký problém, neboť časový úsek spouštění není příliš velký (jednotky sekund) a motory sami o sobě bývají vůči teplotě dostatečně dimenzované [17].

Pokud je u třífázového softstartéru počáteční proud čtyřnásobný, tak zpravidla u neřízené fáze dvoufázového softstartéru bývá o 30% větší. Ani zde se nejedná o závažný problém (při náběhové rampě). Proudové omezení softstartéru (*Obrázek 31*) totiž zajistí nižší počáteční proud během startu. Navíc, po dosažení jmenovitých otáček motoru zajistí tzv. obtokové spínače (bypass contacts) vypojení (zkratování) tyristorového měniče [17].



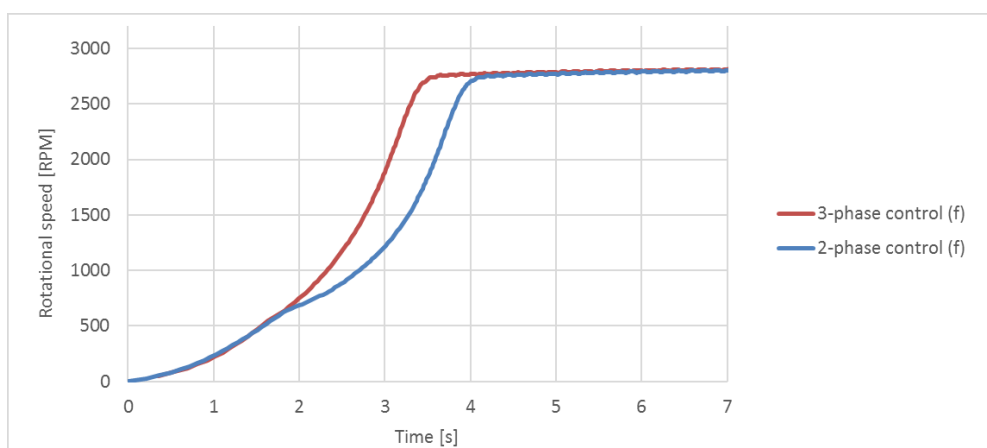


Obrázek 31 – Průběh efektivní hodnoty proudu a) s proud. omezením b) bez proud. omezení [17]

Dalším průvodním jevem je pokles napájecího napětí při větší proudové vlně, který je však u dvoufázového softstartéru menší v porovnání s *DOL* zapojením a zároveň nepatrně (zanedbatelně) větší než u třífázového softstartéru. Velikost poklesu je především závislá na jmenovitém výkonu transformátoru (nebo generátoru), hodnotě impedance a na jeho zkratovém proudu. I přesto však většina motorů je uzpůsobena na pokles napájecího napětí (méně jak 90%), tudíž i tento rozdílový faktor můžeme zanedbat [17].

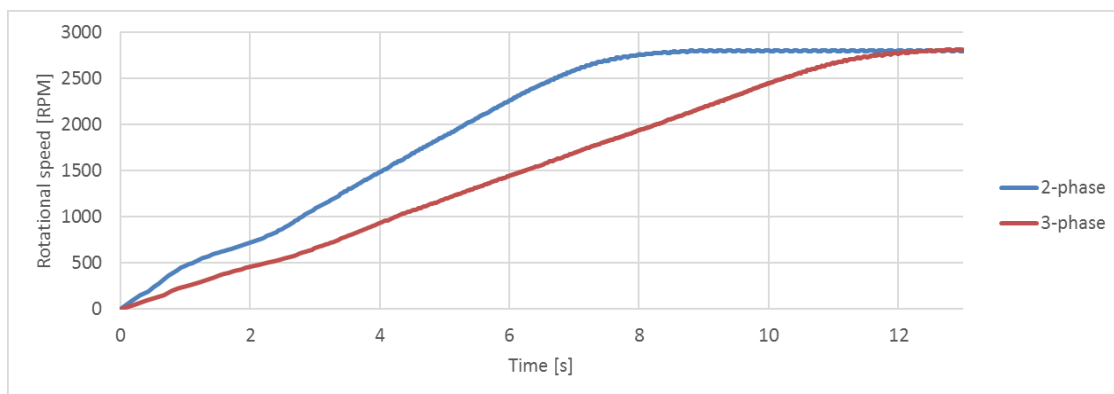
Z hlediska uživatele nás však hlavně zajímá, jak moc se liší dvoufázový a třífázový softstartér v jejich hlavní funkci. Analýza se tedy především zabývá rozběhovou rampou. Rozběhovou rampu dělíme na napěťovou a momentovou.

Obrázek 35 ukazuje rozběhovou rampu dvoufázového a třífázového softstartéru pro nastavený čas 5s, při počátečním napětí 30% (lehká zátěž). Jak je vidět, průběh dvoufázového softstartéru je od času 2s zhruba o 0,5 s zpožděn za třífázovým softstartérem. Toto zpoždění je relevantní v případě použité zátěže motoru. Lze však předem říct, že pro lehké aplikace je tento start adekvátní [17].



Obrázek 32 – Průběh napěťové rampy pro dvoufázový a třífázový softstartér [17]

Na rozdíl od napěťové rampy se řízení točivého momentu během startu provádí lineárně, z důvodu lineárního vzrůstu rychlosti. Tudíž výsledná startovací rampa je časově delší, avšak často i přijatelnější pro pracovní mechanismy motoru [17]. Na Obrázku 33 je zobrazeno srovnání momentového řízení dvoufázového a třífázového softstartéru.



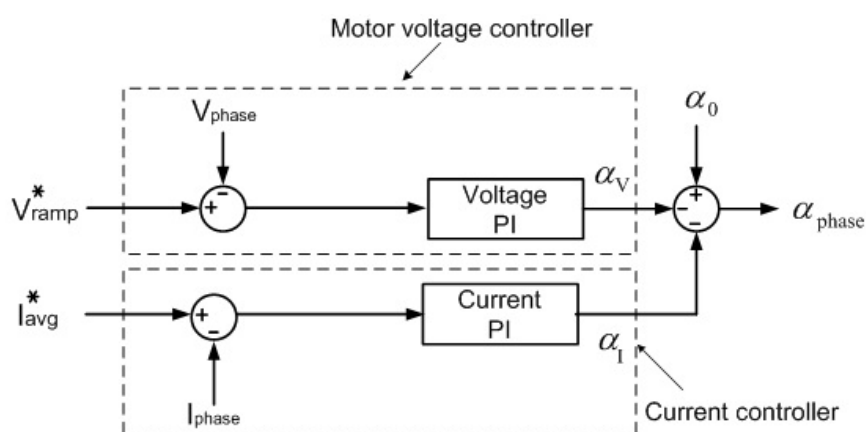
Obrázek 33 – Porovnání dvoufázového a třífázového softstartéru při řízení točivého momentu [17]

Odpověď na to, zdali je lepší zrychlení dvoufázového nebo třífázového softstartéru, není podle Obrázku 33 jednoznačná. V tomto případě totiž záleží na vlastnostech zátěže motoru.

### 3.2.3.1 Regulace fázové nesouměrnosti

U dvoufázového softstartéru je již známo, že během startu dochází k nerovnováze proudů mezi řízenou a neřízenou fází. Reálně je však možné vytvořit odpovídající regulátor v uzavřené smyčce.

Řídicí jednotka v uzavřené smyčce generuje proudový impuls dvou fází nezávisle na počátečním řídicím úhlu. V regulátoru (Obrázek 34) se využívá 2 typů smyček pro každou fázi – napěťová *PI* smyčka a proudová *PI* smyčka. Právě pomocí výstupních hodnot z těchto smyček, se vypočítá výsledný řídicí úhel (vztah 3.8) [18].



Obrázek 34 – Regulátor v uzavřené smyčce pro jednu fázi [18]

$$\alpha_{phase} = \alpha_0 - \alpha_V - \alpha_I [^\circ] \quad (3.8)$$

kde  $\alpha_I$  a  $\alpha_V$  jsou výstupní úhly z proudové a napěťové smyčky a  $\alpha_0$  je počáteční řídicí úhel jedné fáze.

$V_{ramp}$  je rampové napětí, které slouží jako referenční hodnota a obsahuje hodnoty – čas rozběhu (rampy), počáteční napětí rampy a konečné napětí rampy. Svorková efektivní hodnota napětí na svorkách motoru mezi dvěma fázemi se porovnává s referenčním napětím  $V_{ramp}$  a veškeré vzniklé odchylky vyreguluje napěťový regulátor *PI*. Napěťová smyčka je tedy schopna regulovat napětí dvou řízených fází. Avšak napětí ve třetí (neřízené) fázi se bude lišit a z tohoto důvodu je přítomná ještě proudová smyčka s *PI* regulátorem. Referenční hodnotou pro proudovou smyčku je průměrná hodnota efektivních hodnot ve všech fázích  $I_{avg(RMS)}$  (na obrázku jako  $I_{avg}^*$ ), tj. aritmetická hodnota průměru efektivních hodnot fází (vztah 3.9) [18].

$$I_{avg(RMS)} = \frac{I_{1(RMS)} + I_{2(RMS)} + I_{3(RMS)}}{3} [A] \quad (3.9)$$

Referenční hodnota ( $I_{avg(RMS)}$ ) se porovnává s efektivními hodnotami proudu řízených fází a vzniklé odchylky se vyregulují proudovým regulátorem *PI*. Cílem je tedy rovnost efektivních hodnot proudů fází s referenční hodnotou  $I_{avg(RMS)}$  [18].

## 4 Analýza trhu komerčně dostupných střídavých měničů

Jako další hlavní uváděnou kapitolou je průzkum trhu střídavých měničů. Kapitola je chronologicky umístěna až po několika stranách, což má samozřejmě své opodstatnění. Už jen z důvodu návaznosti na problematiku dimenzování měniče z hlediska použitého pracovního mechanismu. Klade si tak primárně za cíl uvést odbornou veřejnost do přehledu vyráběných střídavých měničů pro různé druhy využití. Načež sekundárním záměrem je přiblížit čtenáři i princip funkce. Vodítkem pro obsah bude představa běžného uživatele, jenž potřebuje informace o dostupnosti jednotlivých měničů pro jednotlivé aplikace.

Budeme-li se z počátku opět držet střídavých měničů pro měkký rozběh střídavého motoru, prvním aspektem pro výběr měniče je jeho obecné přizpůsobení. V úvahu přichází hned několik faktorů, např. nadmořská výška, teplota okolí nebo více důležité – počet startů za hodinu (viz kapitola 3.1.1.2). Z tohoto důvodu je potřebné rozdělit střídavé měniče do dvou skupin, a sice na střídavé měniče pro těžkou a lehkou zátěž. Obě skupiny mají své specifické zařazení v oblasti používaných pracovních mechanismů. Pro názornost postačí přiložená *Tabulka 1*.

*Tabulka 1 – Specifikace lehké a těžké zátěže [4]*

	<b>Normální rozběh (lehká zátěž) – třída 10</b>	<b>Těžký rozběh (těžká zátěž) – třída 30</b>
Pracovní mechanismy	ohýbačky, odstředivá čerpadla kompresory, dopravníkové pásy výtahy, eskalátory	drtiče, odstředivé ventilátory mlýny, dopravníkové pásy mixéry, míchadla
Výběr stř. měniče	podle jmenovitého proudu motoru	podle jmenovitého proudu motoru, který je naddimenzován
Pro více jak 10 rozběhů, nutno vybrat stř. měnič o jeden řád větší než činí jmenovitá hodnota proudu motoru		

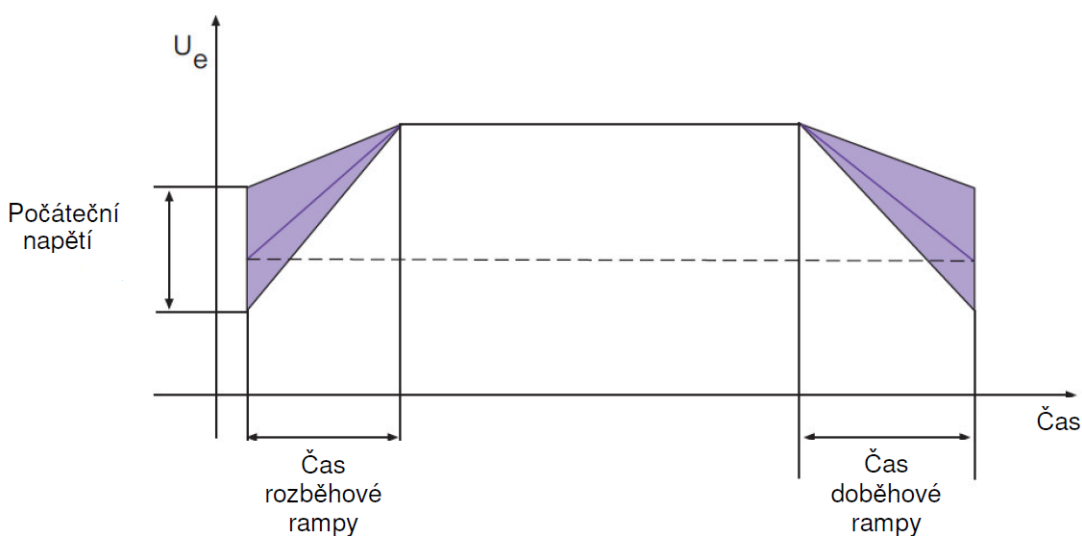
### **Všeobecně používané parametry u střídavých měničů pro měkký rozběh**

Druhým aspektem je informovanost v oblasti používaných parametrů u měničů pro měkký start. Jejich znalost může z velké části posloužit k celkové koncepci zapojení. V předešlých statích byly již některé parametry zmiňované, avšak s častým vzájemným odstupem. Vyhrazuji si tedy prostor sjednotit parametry do jednoho celku a uvést jejich relevantní popis.

**Rozběhová rampa** – Základní veličinou je zde čas, tj. časový interval, začínající ve většině případů od zadaného počátečního napětí a končící v jmenovité hodnotě napětí zátěže. Graficky vyjádřeno jako závislost efektivní hodnoty napětí na čase. Rozlišujeme napěťovou a momentovou rozběhovou rampu. Příliš dlouhá doba rozběhové rampy není doporučována z důvodu ohřevu izolací motoru a tím vedoucí k iniciaci tepelného relé [4].

**Doběhová rampa** – S rozběhovou rampou souvisí i doběhová rampa, významově stejně jako start a konec. U doběhové rampy taktéž figuruje čas, který určuje celkovou strmost snižujícího výstupního napětí. Pokud je tedy čas doběhové rampy 0, dojde ke snížení efektivní hodnoty napětí na nulu okamžitě. Nenulová rampa se používá především u dopravníkových pásů a čerpadel [4].

**Počáteční napětí** – Parametr, udávající začátek/konec rozběhové/doběhové rampy. Z logické analýzy plyne, že čím větší je počáteční napětí, tím menší je rozběhová (doběhová) rampa a zároveň tím menší jsou tepelné účinky na zátěž (motor). Počáteční napětí primárně závisí na druhu aplikace, protože je nutné si uvědomit, že moment klesá s kvadrátem napětí. Pokud je tedy počáteční napětí příliš nízké, nemusí dojít k rozběhu (moment zátěže je větší než moment motoru) [4].



Obrázek 35 – Grafické znázornění rozběhové, doběhové rampy a počátečního napětí [4]

**Proudové omezení** – Může být zapotřebí v případě, kdy dojde během rozběhové rampy k navýšení proudu. V tomto případě nedojde k následnému navyšování výstupního napětí, nýbrž k jeho udržování na konstantní hodnotě, a to až do doby, než se proud zase ustálí, poté dochází již k opětovnému navyšování napětí. Proudové omezení je nutné brát spíše jako doplňkovou funkci [4].

**Jmenovitý proud** – Základní parametr, podle něhož vybíráme zátěž, popřípadě podle zátěže vybíráme měnič. Pokud je zátěží motor, výběr závisí i mimo jiné na druhu zátěže motoru (pracovní mechanismus).

**Jmenovité provozní napětí** – U jednofázových měničů se tento parametr odvíjí od efektivní hodnoty fázového napětí v síti (typicky 110 až 120 V nebo 220 až 250 V). U třífázových měničů se udává efektivní hodnota sdruženého napětí v rozmezí hodnot od 200 V do 690 V. Hodnoty jsou udávány pro kmitočet sítě 50 Hz nebo 60 Hz [4].

**Napájecí napětí** – Napětí potřebné k napájení vnitřních obvodů. Typicky v rozmezí hodnot 110 až 120 V nebo 220 až 250 V [4].

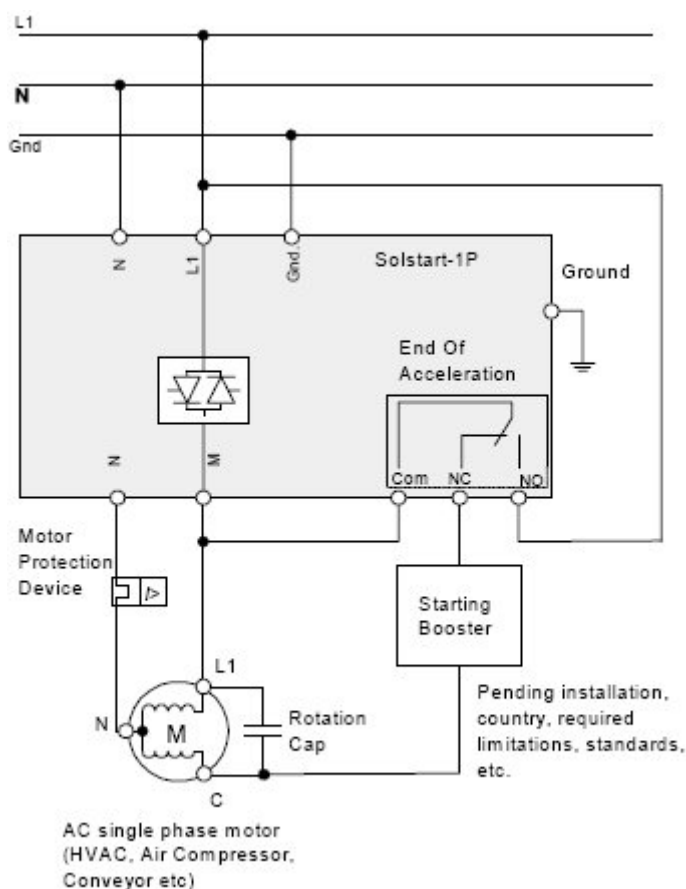
**Ovládací napětí** – Napětí určené pro řízení samotného měkkého rozběhu. Typicky v rozmezí hodnot 24 až 480 V [4].

## 4.1 Jednofázové střídavé měniče s měkkým rozběhem

### 4.1.1 Univerzální analogový softstartér (SOLSTART)

Jak už z názvu vypovídá, jedná se o softstartér pro univerzální použití. Výrobce označený jako typ *SOLSTART*. Takto označený stř. měnič deklaruje použití analogových součástek. Uvedený typ není nijak umístěn ve speciální šasi a je tak prodáván ve formě osazeného plošného spoje se vstupně/výstupními svorkami.

Z důvodu špatné kvality obrázku od výrobce (skutečné podoby zařízení) přikládám alespoň schéma zapojení přípravku se zátěží (Obrázek 36).



Obrázek 36 – Schéma zapojení přípravku se zátěží [19]

Z Obrázku 36 je patrná funkce celého zapojení. Proto lze usoudit, že hlavními činiteli fázového řízení jsou zde dva antiparalelně zapojené tyristory (popřípadě jeden triak). Jako zátěž je zde vyobrazen motor s rozběhovým kondenzátorem (*Rotation Cap*), který je sériově připojen k pomocnému vinutí a paralelně vůči hlavnímu vinutí, které je připojeno přímo, nebo přes příslušnou ochranu (*Motor Protection Device*) k napájecím svorkám přípravku (*M* a *N*). Součástí přípravku je elektromechanický spínač (relé), zajišťující vypnutí (zkrat) tyristorů během jmenovitých otáček (vodivé spojení svorek

*NO* a *Com*). Kromě toho zajišťuje vodivé sepnutí svorek *Com* a *NC*, jenž vede k iniciaci připojeného startéru motoru (*Starting Booster*). Napájení celého obvodu je prostřednictvím síťového napětí (svorky *L1*, *N* a *GND*).

Podstatně důležitou částí je přehled parametrů, které udává výrobce a podle kterých se běžný uživatel řídí při návrhu celkového zapojení. Soupis parametrů, včetně poznámek, je obsažen v *Tabulce 2*.

*Tabulka 2 – Přehled uváděných parametrů od výrobce [19]*

Parametr	Hodnota	Poznámka
Operating voltage	240 V AC	Jmenovité provozní napětí – střídavé napětí 240 V
Motor current	1-18 A	Hodnota proudu zátěže (motoru)
Current limit	3xIn	Proudové omezení – násobek jmenovitého proudu
Starting time	≤ 1s	Doba měkkého startu
Ambient temperature	50 °C	Maximální provozní teplota
Applications	Machine tools, compressors, electrode welders, transformers, high inrush fan motors, ...	Použití – obráběcí stroje, kompresory, elektrodové svářečky, transformátory, vysokozátěžové ventilátory atd....
Dimensions	50x70 mm	Rozměry desky plošného spoje

Podle uvedených parametrů v *Tabulce 2*, se jedná spíše o nízko výkonový střídavý měnič pro běžné domácí spotřebiče. Lehkovážnost je prisuzována i ke konkrétním hodnotám parametrů. Například doba měkkého startu (*Starting Time*) je udávána méně jak 1s, což je oproti jiným komerčním měničům krátká doba. Za důležitý údaj považuji jmenovitý kmitočet, který se však v přehledové tabulce nevyskytuje. Pokud by byl přípravek dimenzován na západní kmitočet, tj. 60 Hz, měl by být tento fakt zveřejněn. Některé měniče v jiných případech používají dvojitý kmitočtový přizpůsobení (50 i 60 Hz). Vzhledem k nesrovnalosti je nutné kontaktovat přímo výrobce a žádat o dodatečnou specifikaci.

#### 4.1.2 Regulátor soft start/stop pro čerpadlové motory

Zatímco měkký start je pro uživatele již samozřejmostí, téměř stejného užitku se dostává i měkkému doběhu. Obě vlastnosti splňuje tento regulátor rozběhu a doběhu. Označení regulátor je záměrně kvůli funkci, kterou tento střídavý měnič disponuje, a sice volitelným nastavením času rozběhu a doběhu. Oproti předešlému zapojení jsou jeho komponenty uschovány v plastové šasi. Vzniká tak větší ochrana proti prachu, okolní vlhkosti a nebezpečí dotyku se síťovým napětím.



Obrázek 37 – Vnější vzhled regulátoru měkkého rozběhu a doběhu [20]

Tabulka 3 – Přehled uváděných parametrů od výrobce [20]

Parametr	Hodnota	Poznámka
Main power	AC 110 V/ 220 V $\pm 10\%$	Jmenovité provozní napětí - 110 V nebo 220 V, tolerance $\pm 10\%$
Rated current	1 HP, 2 HP, 3 HP, 5 HP, 7.5 HP, 10 HP	Hodnota proudu zátěže – v koňské síle (Horse power)
Work frequency	47-63 Hz	Provozní frekvence
Output range	0-100%	Rozsah výstupu
Environment	-10 °C-50 °C, humidity under 90% RH	Provozní teplota pod 90% vlhkosti vzduchu
Dimensions	L: 75 mm W: 102 mm H: 103 mm	délka: 75 mm šířka: 102 mm výška: 103 mm

Množství parametrů v *Tabulce 3* je takřka shodné s předešlou tabulkou (*Tabulka 2*). Zvláštní pozornost patří hodnotě proudu zátěže (*Rated Current*), která v tomto případě není udávána v jednotkách ampér, ale v koňských silách. Hodnot proudu je uvedeno více, z důvodu uživatelské volby. Přepočít proudu na obvyklé jednotky je uveden níže (vztahy 4.1 a 4.2). Použití je především na čerpadlové motory, avšak výrobce zmiňuje i možnost jiného využití, např. pro pohony elektrických vrat.



Vyjádření proudu v obvyklých jednotkách pro 1 HP:

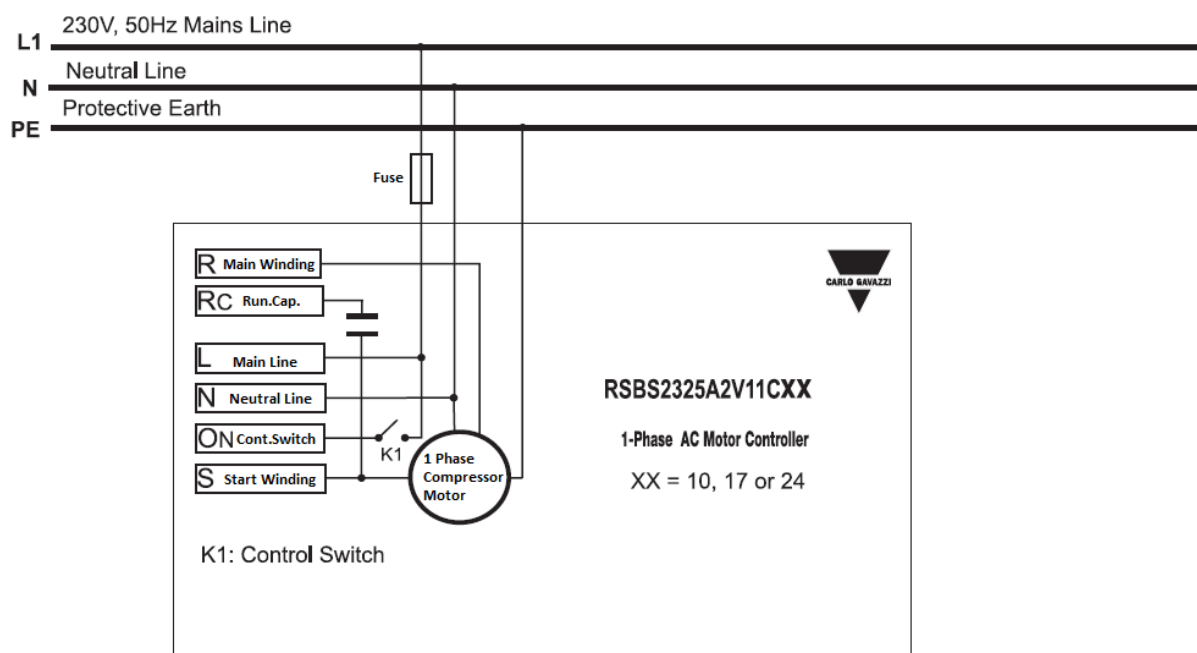
$$1 \text{ HP} = 745,7 \text{ W} \quad (2 \text{ HP} = 2 \cdot 745,7 = 1491,4 \text{ W})$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \rightarrow I = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi} = \frac{745,7}{230 \cdot \cos\varphi} \text{ (pro napětí 230 V) [W]} \quad (4.1)$$

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi} = \frac{745,7}{120 \cdot \cos\varphi} \text{ (pro napětí 120 V) [A]} \quad (4.2)$$

### 4.1.3 Polovodičový softstartér pro kompresorové motory

Poslední ze skupiny jednofázových softstartérů je polovodičový softstartér, určený k řízení kompresoru. Indikace provozu nebo chyb je realizována zelenou nebo červenou signalizační diodou. Součástí zařízení je i elektromechanické relé, zastávající funkci přemostění polovodičů po dosažení měkkého startu. Většina modelů z řady (kromě C00) má integrovaně zabudovaný rozběhový kondenzátor, sloužící k prvotnímu vytvoření magnetického pole, společně s pomocným vinutím (*Start Winding*). Provozní kondenzátor (*Running Capacitor*) je nedílnou součástí všech modelů řady [21].



Obrázek 38 – Blokové schéma zapojení polovodičového softstartéru [21]

Zařízení má i mnoho vestavěných ochranných opatření, mezi které patří podpětňová a přepětňová ochrana, přičemž ochranu proti zkratu a přetížení je nutné zapojit externě. Montáž může být provedena pomocí DIN lišty nebo panelu [21].

Uživatelsky relevantní jsou výrobcem udávané parametry zařízení. U této řady je uvedeno několik parametrů, mnohdy však stačí znát menší část z nich s tím, že dodatečně je možné si parametry

dohledat. Proto uvedu adekvátní množství informací pro běžného uživatele tak, aby korespondovalo s množstvím parametrů uvedených v úvodu čtvrté kapitoly. Přehled parametrů je uveden v *Tabulce 4*.

*Tabulka 4 – Přehled základních parametrů softstartéru [21]*

Základní parametry zařízení			
	Parametr	Hodnota	Poznámka
Parametry napájení	Rated operational voltage	230 V AC RMS $\pm$ 15%	Jmenovité provozní napětí – efektivní hodnota střídavého napětí s tolerancí $\pm$ 15%
	Current at no load	$\leq$ 15 mA	Odběr proudu zařízení v případě nepřipojené zátěže
	Rated insulation voltage	250 V AC RMS	Nejvyšší provozní napětí, vyjádřené v efektivní hodnotě (hodnota platná i v případě vstupních parametrů)
Vstupní parametry	Control voltage	230 V AC RMS $\pm$ 15%	Ovládací napětí – efektivní hodnota střídavého napětí s tolerancí $\pm$ 15%
	Pick up voltage	90 V AC	Hodnota vstupního napětí, při které dojde k bezproblémové regulaci výstupního napětí
	Drop out voltage	25 V AC	Hodnota vstupního napětí, při které nedochází k regulaci výstupního napětí
	Rated AC frequency	50 Hz $\pm$ 5 Hz	Provozní (napájecí) frekvence – s tolerancí $\pm$ 5 Hz
Všeobecné parametry	Ramp up	<0,6 sec	Doba měkkého startu (rampy) - méně jak 600 ms

	Operating temperature	-20° to +65 °C (-4° to +149 °F)	Doporučené rozmezí teplot při používání (hodnota ve stupních Fahrenheita)
	Storage temperature	-30° to +70 °C (-22° to +158 °F)	Doporučené rozmezí teplot při skladování (hodnota ve stupních Fahrenheita)
	Degree of protection	IP20	Stupeň krytí – zařízení je chráněno před dotykem prstu, ale není voděodolné
	Relative humidity	< 95%	Relativní vlhkost – použitelnost zařízení při méně jak 95% vlhkosti
	Altitude	1000 m	Doporučená nadmořská výška při užívání
	Dimensions	135 x 81,4 x 60.4 mm	Délka: 135 mm Šířka: 81,4 mm Výška: 60,4 mm
Výstupní parametry	Rated operational current	25 A AC-53b	Provozní jmenovitý proud (střídavý) - <i>AC-53b</i> je kategorie pro výběr spínače (relé, stykače)
	Max.starting current	40 A AC RMS	Efektivní hodnota maximálního rozběhového proudu
	Starts per hour	12 (evenly distributed)	Dovolený počet spouštění za hodinu (při rovnoměrném spouštění)
	I <sup>2</sup> t for fusing t=10ms	1200 A <sup>2</sup> s	Hodnota Jouelova integrálu pro čas t = 10 ms (návrh ochranných pojistek)



*Obrázek 39 – Vzhled polovodičového softstartéru pro kompresorové motory [21]*

Za doplňkové informace už pak lze považovat například jen významy indikačních diod. Analyzovaný model disponuje 2 světelnými diodami – zelenou a červenou.

Zelená dioda informuje o kondici provozního napětí a může nabývat několika stavů:

- při napětí  $<90$  V AC, dojde k vyhodnocení podpětí provozního napětí a dioda začne blikat;
- pokud napětí  $>90$  V AC a dioda bliká, signalizuje svou přerušovanou indikací poruchu v provozním napětí;
- pokud napětí  $>90$  V AC a dioda nepřerušovaně svítí, k zařízení je připojeno provozní napětí a pracuje tak správně.

Červená dioda signalizuje alarm a může nabývat několika stavů:

- při napětí  $<190$  V AC, dojde k vyhodnocení podpětí ovládacího napětí a softstartér se vypne (vypnutí náběžné rampy) – dioda svítí plně. Po obnovení napětí začne dioda blikat a po uběhnutí 5 minut se softstartér zapne (pokračuje náběh rampy);
- při proudu  $>80$  A, dojde k vyhodnocení nadproudu a softstartér se vypne (vypnutí náběžné rampy) – dioda bliká. Softstartér se vždy zapne po uplynutí 5 minut (za předpokladu snížení hodnoty proudu);
- při poruše rozběhového kondenzátoru začne dioda blikat jedenkrát za 2 sekundy [21].

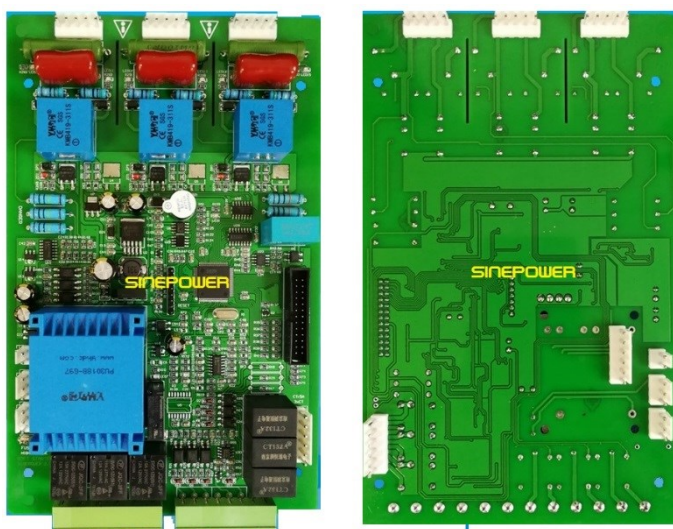
## **4.2 Třífázové střídavé měniče s měkkým rozběhem**

### **4.2.1 Mikroprocesorový softstartér řady STC 52 pro univerzální použití**

Jednou z mnoha metod jak řídit polovodičové spínací prvky je pomocí digitálních obvodů, přesněji pomocí mikroprocesorů. Právě tuto metodu využívá softstartér řady STC 52, jehož obecná analýza je uvedena níže.

Samotná regulace výstupního napětí je provedena pomocí antiparalelně zapojených tyristorů na každou fázi zvlášť, přičemž generátorem proudových pulzů do řídící elektrody je pulzní transformátor (pro každou fázi zvlášť), řízený šestipulzním transformátorem. Celý proces řízení zajišťuje 32-bitový mikroprocesor se sériovou komunikací RS485 (pouze u některých modelů) [22].

Softstartér obsahuje i výstupní porty pro komunikaci s vnějšími periferiemi, jako je například LCD displej se zabudovaným ovládáním. Uživatel tak kromě indikace provozu uvidí ještě poruchová hlášení a parametry rozhraní, které může i zároveň nastavit. Vybrané nastavení se uloží do paměti bez rizika vymazání dat po vypnutí. Vnější periferie se však prodávají samostatně [22]. Výčet základních parametrů je obsažen v *Tabulce 5*.



Obrázek 40 – Vzhled mikroprocesorového softstartéru řady STC 52 [22]

Tabulka 5 – Přehled základních parametrů softstartéru řady STC 52 [22]

Základní parametry zařízení		
Parametr	Hodnota	Poznámka
Working power supply	380 V AC $\pm$ 15% 50/60 Hz	Napájecí napětí – střídavé s tolerancí $\pm$ 15% při frekvenci 50/60 Hz
Rated working voltage	380VAC $\pm$ 15% 50/60 Hz	Jmenovité provozní napětí – střídavé s tolerancí $\pm$ 15% při frekvenci 50/60 Hz
Rated working current	10-100 A	Jmenovitý proud
Initial starting voltage	10-99%	Počáteční napětí při startu
Soft start mode	voltage ramp and limited current start, voltage sudden jump start, constant current start	Varianty měkkého startu (viz.níže)

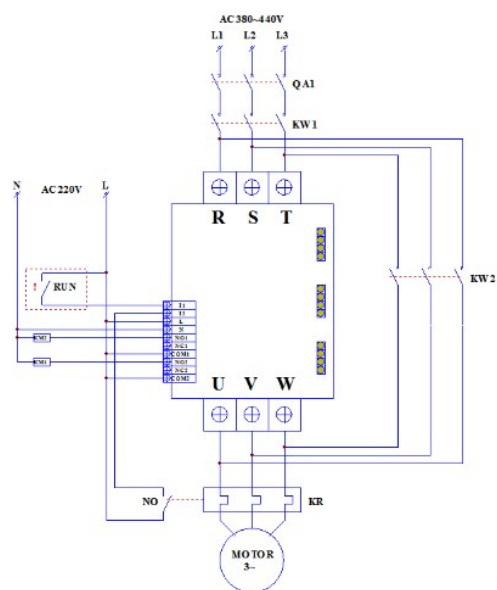
Soft start time	1-200 seconds	Doba rozběhu
Alarm relay contact capacity	250 V AC/10 A	Provozní hodnoty kontaktů relé
Current transformer	5A standard transformer signal	Hodnota proud pulzního transformátoru při běžném řízení
Starting frequency	the starting time interval should not be less than 5 minutes	Četnost startů – nedoporučuje rozestup méně jak 5 minut
Ambient temperature	-20 °C-60 °C	Rozsah provozní teploty
Relative humidity	≤90%	Relativní vlhkost (menší nebo rovno 90%)
Altitude	less than 3000 meters	Použití v nadmořské výšce (méně jak 3000 m)
Dimensions	215 x 136 x 35 mm	Délka: 215 mm Šířka: 136 mm Výška: 35 mm

Zajímavým údajem v *Tabulce 5* je možnost volby měkkého startu (*Soft Start Mode*), přičemž na výběr je možnost napěťové rampy s omezením proudu, skokovým napětím nebo s konstantním proudem. Výrobce tak umožňuje uživateli nastavit příslušný typ startu, v závislosti na charakteru zátěže. Mezi implementované ochrany patří ochrana proti nerovnováze proudů ve fázích, výpadku fáze a nadproudu [22].

#### 4.2.2 Polovodičový softstartér pro kompresorové motory

Dalším střídavým měničem v kategorii třífázového provozu je softstartér pro kompresorové motory. Kromě měkkého rozběhu umožňuje i měkký doběh a to nastavením bitů na vestavěném kódovém spínači, stejně tak, jako v případě nastavení počátečního napětí. Z důvodu životnosti a vznikajícího tepla měniče jsou součástí obvodu i integrované spínače na přemostění softstartéru (*Bypass Contactors*), které jsou aktivovány po uběhnutí doby měkkého startu. Regulace výstupního napětí je provedena pomocí polovodičových tyristorů [23].

Z ochranných prvků je přítomno nadproudové relé pro případ přetížení. Indikace provozu je realizována pomocí 11 světelných diod, z nichž každá sleduje konkrétní část obvodu (*Tabulka 6*). Pomocí jedné diody například zjistíme, že není připojená vstupní fáze [23]. Jedinou nevýhodou pro běžného uživatele může být nutnost připojení externího napájení (ovládací napětí).



Obrázek 41 – Blokové schéma a vzhled polovodičového softstartéru [23]

Tabulka 6 – Popis indikací diod [23]

Popis indikací diod	
Dioda	Indikace (červená-zapnuto)
D19	Napájení
D20	Spínač 1
D21	Spínač 2
D22	Výstupní relé přemostění
D23	Výstupní relé v otevřeném obvodu
D24	Soft start
D25	Soft stop
D26	Provozní stav
D27	Absence vstupní fáze (chyba)
D28	Zapojení zátěže (chyba)
D29	Stav ochrany

Tabulka 7 – Přehled základních parametrů polovodičového softstartéru [23]

Základní parametry zařízení		
Parametr	Hodnota	Poznámka
Applicable compressor power	380 V/22 kW (Rated current below 40 A)	Provozní hodnoty kompresoru (při jmenovitém proudu <40 A)
Operating voltage range	340-460 V AC	Rozsah jmenovitého provozního napětí
Control voltage	220 V AC	Ovládací napětí
Rated operational current	40 A	Jmenovitý proud
Starting current	≤120 A	Rozběhový proud
Depletion current	≤22 mA	Odběr proudu naprázdno (nepřipojená zátěž)
Dissipation power	<5VA	Ztrátový výkon ( $U \cdot I$ )
Soft start time	≤10 s	Doba měkkého startu s připojenou zátěží
Operating temperature range	-20-65 °C	Rozsah provozní teploty
Relative humidity	0—95%	Relativní vlhkost
Size	222 x 162 x 100 mm	Délka: 222 mm Šířka: 162 mm Výška: 100 mm

Nastavení doby měkkého startu, měkkého doběhu a počátečního napětí se provádí ručně pomocí tří kódových spínačů, z nichž dva jsou rotační. Všechny tři spínače pracují závisle na sobě. Spínač *S1* slouží k nastavení měkkého startu, přičemž maximální doba náběhu může činit až 17 s. Tato hodnota však závisí na použitém kompresoru. Spínač *S2* je ve formě 4-bitového přepínače a slouží k nastavení počátečního napětí, funkce soft stop nebo ke zvýšení kroku napětí během náběhu (nastavení hodnoty kroku se provádí spínačem *S3*). Počet kombinací, resp. funkcí, by v tomto případě činil  $2^4 = 16$ . Výrobce však v popisu uvádí pouze 6, jejichž soupis je obsažen v *Tabulce 8*. Třetí spínač *S3* nastavuje napěťový krok rozběhové rampy.

Tabulka 8 – Přehled funkcí spínače *S3* [23]

Přehled funkcí spínače <i>S3</i>	
Nastavená hodnota	Funkce
0000	konstantní nárůst od 150 V
1000	soft stop funkce
0100	nastavení napěťového kroku (spínač <i>S3</i> )
0001	konstantní nárůst od 100 V
0010	konstantní nárůst od 250 V
0011	konstantní nárůst od 300 V

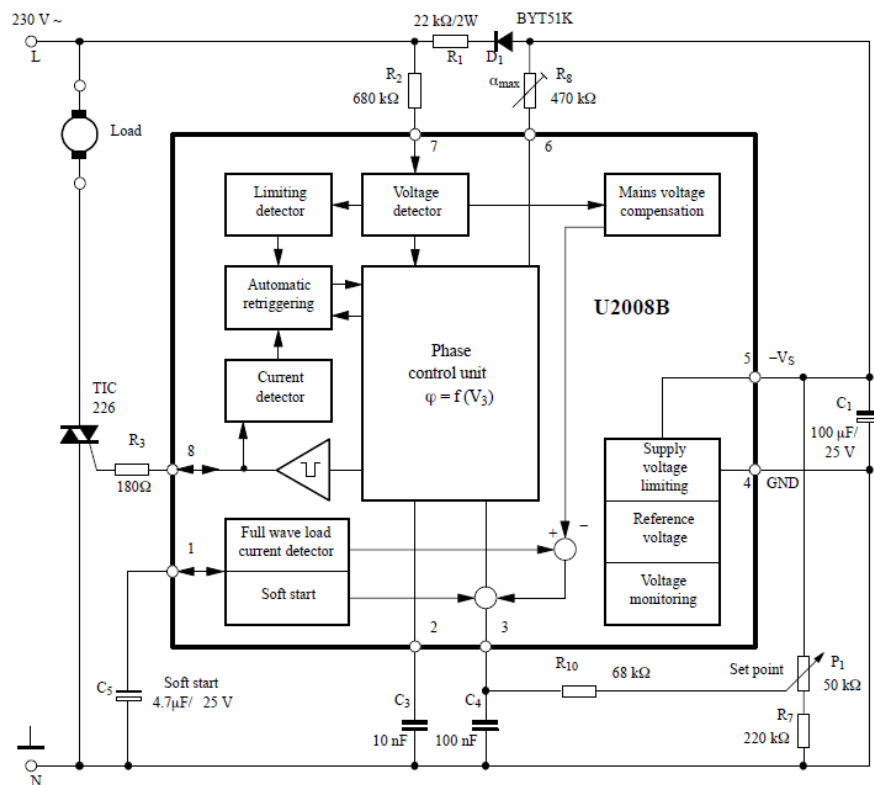


## 5 Realizace a ověření jednofázového střídavého měniče

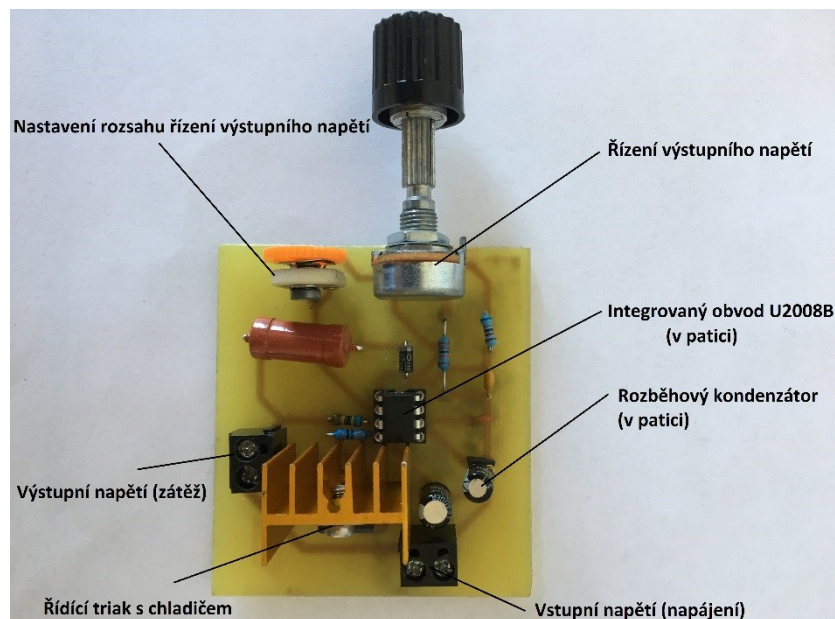
Součástí této práce je i praktická část, v níž je primárním úkolem zhotovit jednofázový střídavý měnič s funkcí měkkého rozběhu, včetně jeho funkčního ověření v podobě grafických výstupů. Předlohou tohoto úkolu mi bylo samotné zadání této práce, a sice *Analýza trhu komerčně dostupných měničů*, přičemž průvodními náležitostmi při kompletaci vhodného měniče mi byly informace obsažené v kapitole *Rozbor možných variant řešení střídavých měničů*.

### 5.1 Realizace

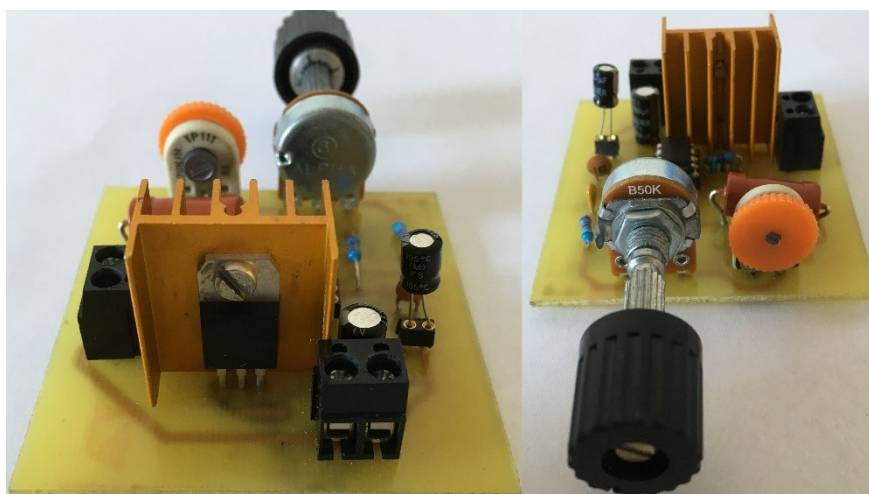
Podkladem pro zhotovení střídavého měniče s měkkým rozběhem bylo zapojení s integrovaným obvodem U2008B od firmy Atmel. Výrobce deklaruje dvojí způsob použití obvodu – snímání proudu (zpětná odezva proudu) a měkký start zátěže. Pro každý typ funkce je jiné zapojení (topologicky nepatrně) a jiné hodnoty parametrů součástek. U obou způsobů však zůstává řízení výstupního napětí v podobě proměnného odporového děliče (potenciometru) [24]. Výchozí (blokové) schéma pro realizaci je uvedeno na *Obrázku 42* a samotná realizace je ilustrována na *Obrázku 43*.



Obrázek 42 – Blokové schéma zapojení U2008B pro měkký rozběh zátěže [24]



*Obrázek 43 – Výsledný vzhled realizovaného měniče s popisem*

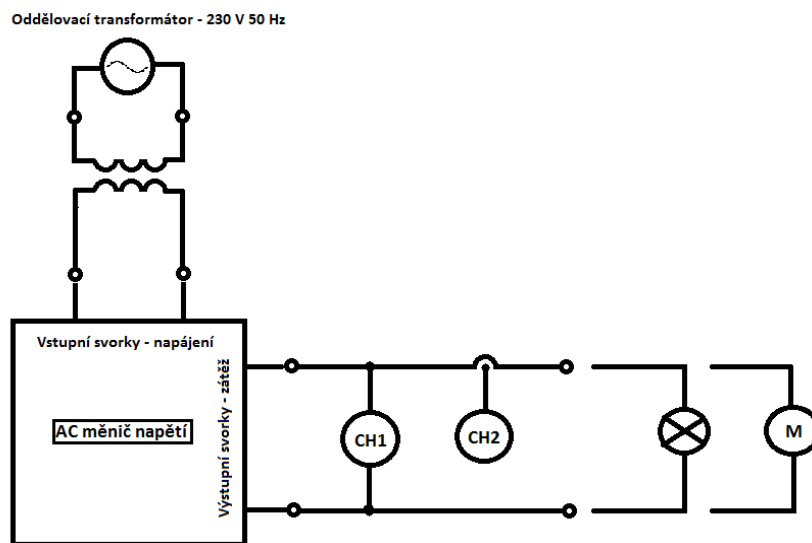


*Obrázek 44 – Další pohledy na realizovaný měnič*

Zobrazeným triakem (Obrázek 43 a 44) je model BT139-800 s jmenovitým proudem 16 A a blokovacím napětím 800 V. Pouzdro triaku je stykově přišroubováno k hliníkovému žebrovanému chladiči. Proměnný odporový dělič pro řízení výstupního napětí je realizován lineárním potenciometrem s drážkovanou hřídelí a hodnotou odporu 50 k $\Omega$ . Samotné napájení integrovaného obvodu U2008B je prostřednictvím sériového zapojení usměrňovací diody a rezistoru s tím, že rezistor je dimenzován na vyšší ztrátový výkon – minimálně 2 W. Z důvodu časové analýzy vlivu kapacity rozběhového kondenzátoru na měkký rozběh byla použita patice pro snadnou výměnu kondenzátorů.

## 5.2 Ověření

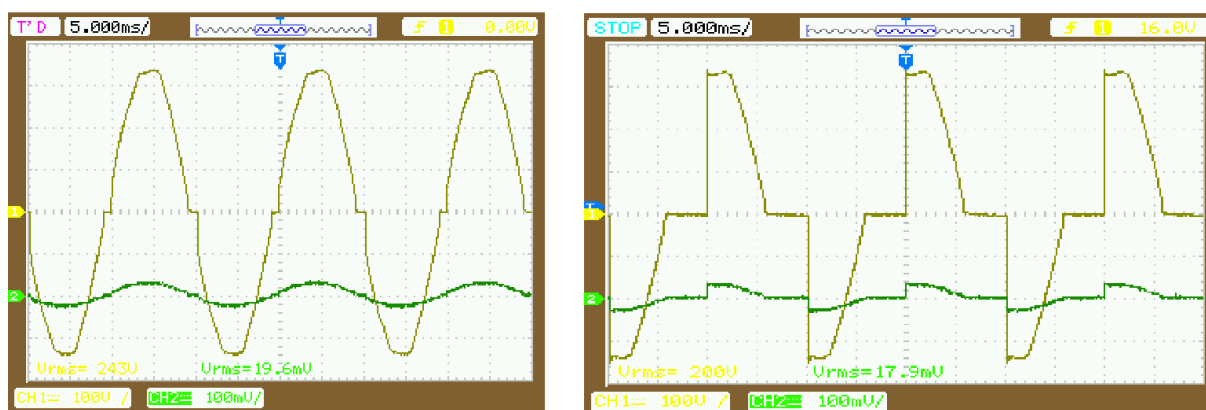
Ověření funkčnosti probíhalo v učební laboratoři fakulty a jako zátěže byly vybrány dva spotřebiče – stolní lampa s příkonem 40 W a stolní vrtačka s příkonem 120 W. Spotřebiče byly vybrány s ohledem na rozdílný charakter zátěže, tj. odporová a motorická (s obsahem indukční složky). Cílem měření bylo zobrazit průběhy napětí a proudu v případě regulace příkonu a měkkého rozběhu každé zátěže. Pro měření měkkého rozběhu byly zvoleny tři hodnoty kapacity rozběhového kondenzátoru –  $1\mu\text{F}$ ,  $4,7\mu\text{F}$  a  $10\mu\text{F}$ . Veškeré hodnoty napětí a proudu jsou brány jako efektivní (*RMS*).



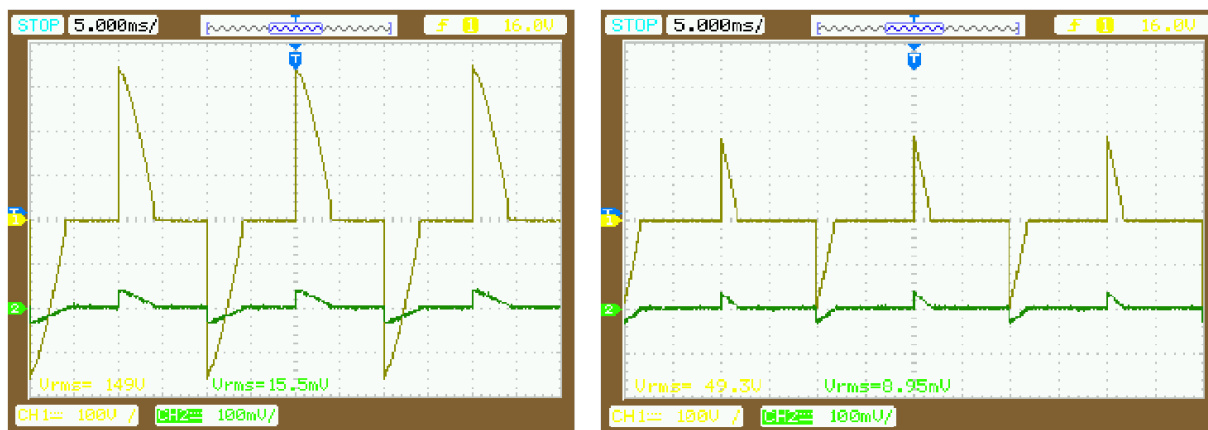
Obrázek 45 – Schéma zapojení měniče pro ověření funkce

### 5.2.1 Odporová zátěž

#### Regulace výstupního napětí

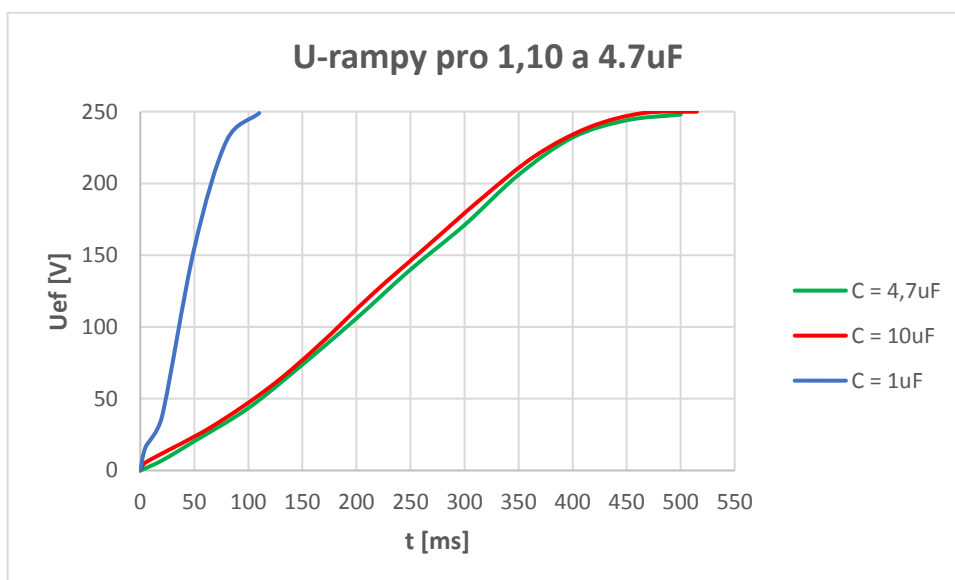


Obrázek 46 – Průběhy napětí (žlutě) a proudu (zeleně) pro 243V (vlevo) a 200V (vpravo)



Obrázek 47 – Průběhy napětí (žlutě) a proudu (zeleně) pro 149V (vlevo) a 49,3V (vpravo)

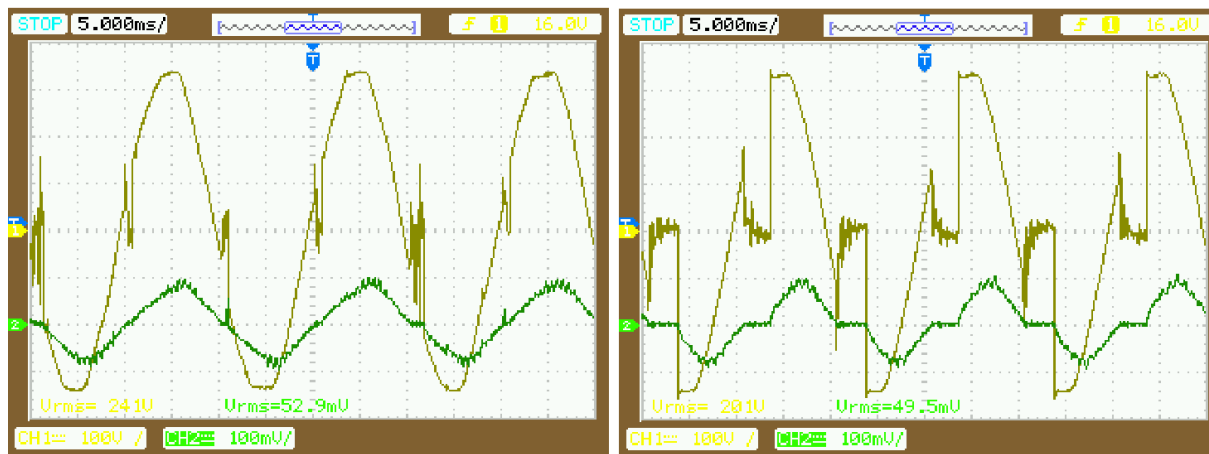
### Napěťová rampa měkkého rozběhu



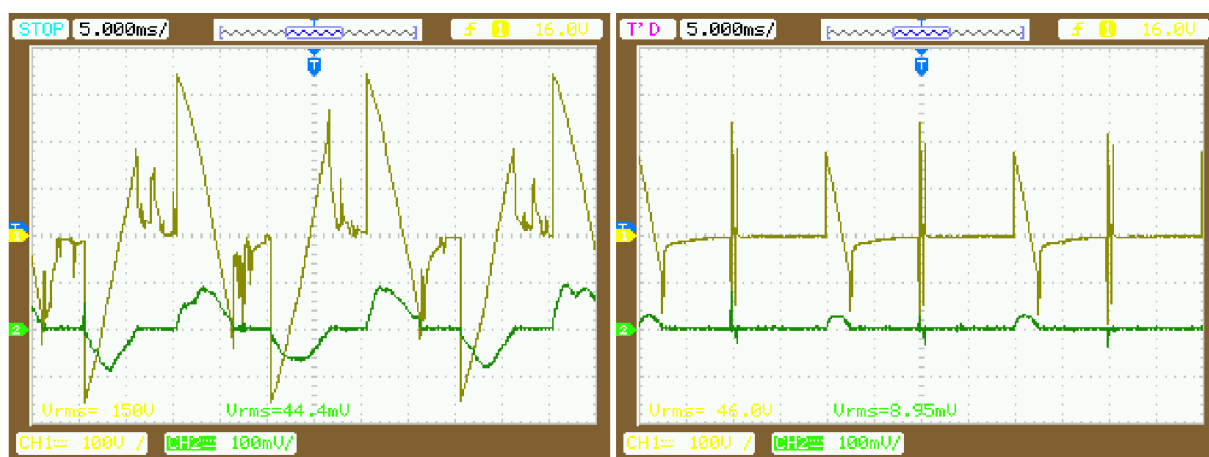
Obrázek 48 – Napěťová rampa měkkého rozběhu odporové zátěže pro různé kapacity

## 5.2.2 Motorická zátěž

### Regulace výstupního napětí

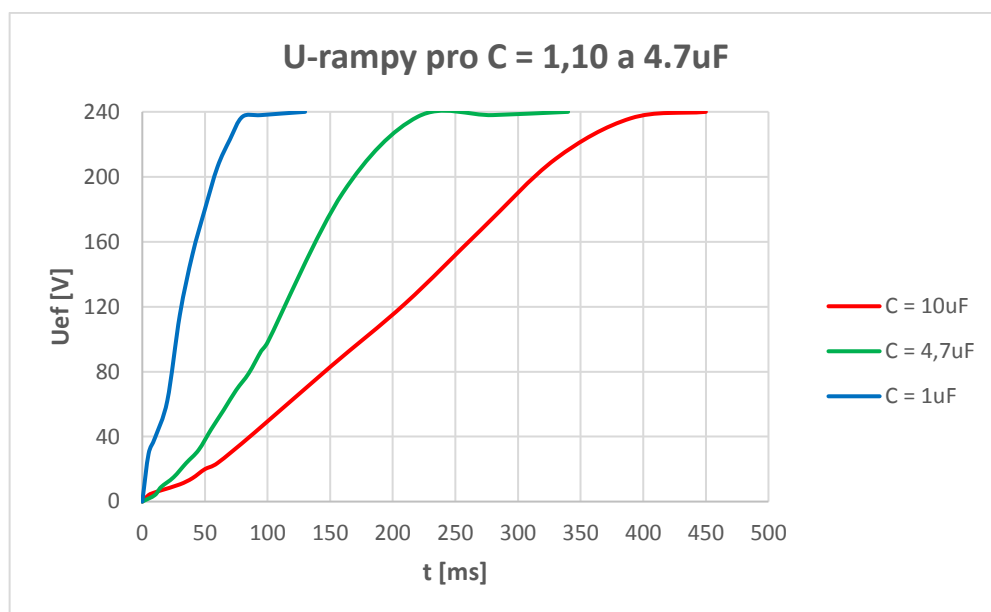


Obrázek 49 – Průběhy napětí (žlutě) a proudu (zeleně) pro 241V (vlevo) a 201V (vpravo)



Obrázek 50 – Průběhy napětí (žlutě) a proudu (zeleně) pro 150V (vlevo) a 46V (vpravo)

### Napěťová rampa měkkého rozběhu



Obrázek 51 – Napěťová rampa měkkého rozběhu motorické zátěže pro různé kapacity

## 6 Závěr

Hlavní podstatou této práce bylo poukázat na praktické využití střídavých měničů napětí a rozvést tak více jejich možnosti použití. Souvislou motivací bylo i nalézt komerčně dostupný střídavý měnič, disponující vlastnostmi, uváděnými v této práci.

Výsledkem snažení je střídavý měnič napětí s integrovaným obvodem U2008B s možností měkkého startu. Dle mého názoru, realizace splňuje nároky běžného uživatele, neboť zapojení není nijak zvlášť složité a lze ho zhotovit z běžných analogových součástek.

Experimentální ověření se ubíralo ve stejném duchu, proto byly zvoleny 2 nejčastěji používané zátěže, a to odporová a motorická (asynchronní motor), v podobě stolní lampy a stolní vrtačky. Naměřené průběhy byly zobrazeny tak, aby jejich viditelný obsah korespondoval s teoretickými předpoklady.

Kladně bych ohodnotil i fakt, že celkové zhotovení přípravku mě obohatilo o značné zkušenosti v oblasti návrhu plošného spoje, dimenzování součástek a měření. Zároveň s realizací jsem dospěl i k dalším možným variantám řešení, zejména v možnostech provedení konstrukčního obalu měniče, tzn. kompozice vestavěné kastle, výstupu v podobě zásuvky nebo přítomnosti panelových měřících přístrojů.

Pro další období je tak pravděpodobné, že moje úsilí bude směřovat právě k více sofistikovanému konstrukčnímu uspořádání a zároveň i k využití digitálních řídicích obvodů s cílem vytvořit plnohodnotné zařízení, rovnající se standardům běžně prodávaných střídavých měničů od velkých výrobců. Nicméně, stanovený cíl této bakalářské práce – vytvořit střídavý měnič podle teoretických předpokladů, byl splněn.

## Použitá literatura

- [1] CHLEBIŠ, Petr. Výkonová elektronika I. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1485-8.
- [2] Spínací polovodičové několika vrstvé součástky. SPŠE Mohelnice [online]. [cit.28-4-19]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zet/vicestve.htm>
- [3] PATOČKA, Miroslav a Petr PROCHÁZKA. *Jednofázový měnič střídavého napětí* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2013 [cit.28-4-19]. Dostupné z: [http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab\\_trojfaz\\_obvody\\_bc.pdf](http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_trojfaz_obvody_bc.pdf)
- [4] ABB. Softstartéry: Průvodce problematikou softstartérů [online]. 2009 [cit.28-4-19]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/Softstarter-%20handbook.pdf>
- [5] Moeller - Základy techniky pohonů - Paralelní zapojení motorů k softstartéru. *Eaton Elektrotechnika s.r.o.* [online]. Copyright © 2009 by Moeller GmbH [cit. 22-04-2019]. Dostupné z: <http://archiv.eatonelektrotechnika.cz/priruckazapojeni/drives009.html>
- [6] What does Soft Start mean? - Sunpower UK. *Custom Power Supplies | Power Supply Design - Sunpower UK* [online]. Copyright © 2018 Sunpower Electronics Ltd [cit. 22-04-19]. Dostupné z: <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-does-soft-start-mean/>
- [7] Smooth start of a single phase induction motor. *SlideShare* [online]. Copyright © 2019 [cit. 28-04/19]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/Edgefx/smooth-start-of-a-single-phase-induction-motor>
- [8] Experiment 3: Thyristor rectifier. *SIUC College of Engineering* [online] Copyright © Engr.Siu [cit. 28-04-19]. Dostupné z: <https://www.engr.siu.edu/staff1/hatz/EE483/LABS/Exp3.html> (9)
- [9] Blokové schéma mikrořadiče 8051. *ELUC*. [cit.28-04-19]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/877>
- [10] PAVELKA, Jiří a Zdeněk ČEŘOVSKÝ. Výkonová elektronika. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02094-0.
- [11] Soft Start of Induction Motor by ACPWM | Rectifier | Alternating Current. *Scribd* [online]. Copyright © 2019 Scribd Inc.[cit.22-04-19]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/203637135/Soft-Start-of-Induction-Motor-by-ACPWM>
- [12] Soft starter for single phase induction | Youth4work Portfolios. *Youth4work: Assessed Professional Profile, Talent Test, Get Jobs* [online]. Copyright © 2019 Youth4work. [cit. 28-04-19]. Dostupné z: <https://www.youth4work.com/y/akashbawaskar3262/Akash-Gajanan-Bawaskar-portfolio/7287-soft-starter-for-single-phase-induction-motor>
- [13] FIALA, Miroslav, Václav KOLÁŘ a Václav VRÁNA. Trojfázové obvody [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2008 [cit. 28-4-19]. Dostupné z: [http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab\\_trojfaz\\_obvody\\_bc.pdf](http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_trojfaz_obvody_bc.pdf)
- [14] Three-phase feeder induction motor with soft starter. | Download Scientific Diagram. *ResearchGate | Share and discover research*[online]. Copyright © ResearchGate [cit. 28-04-

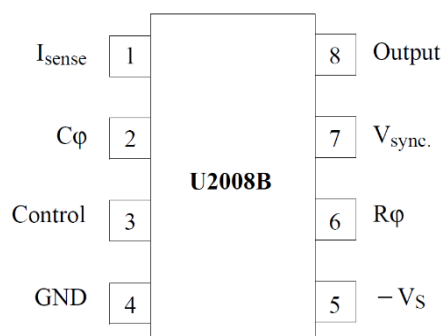
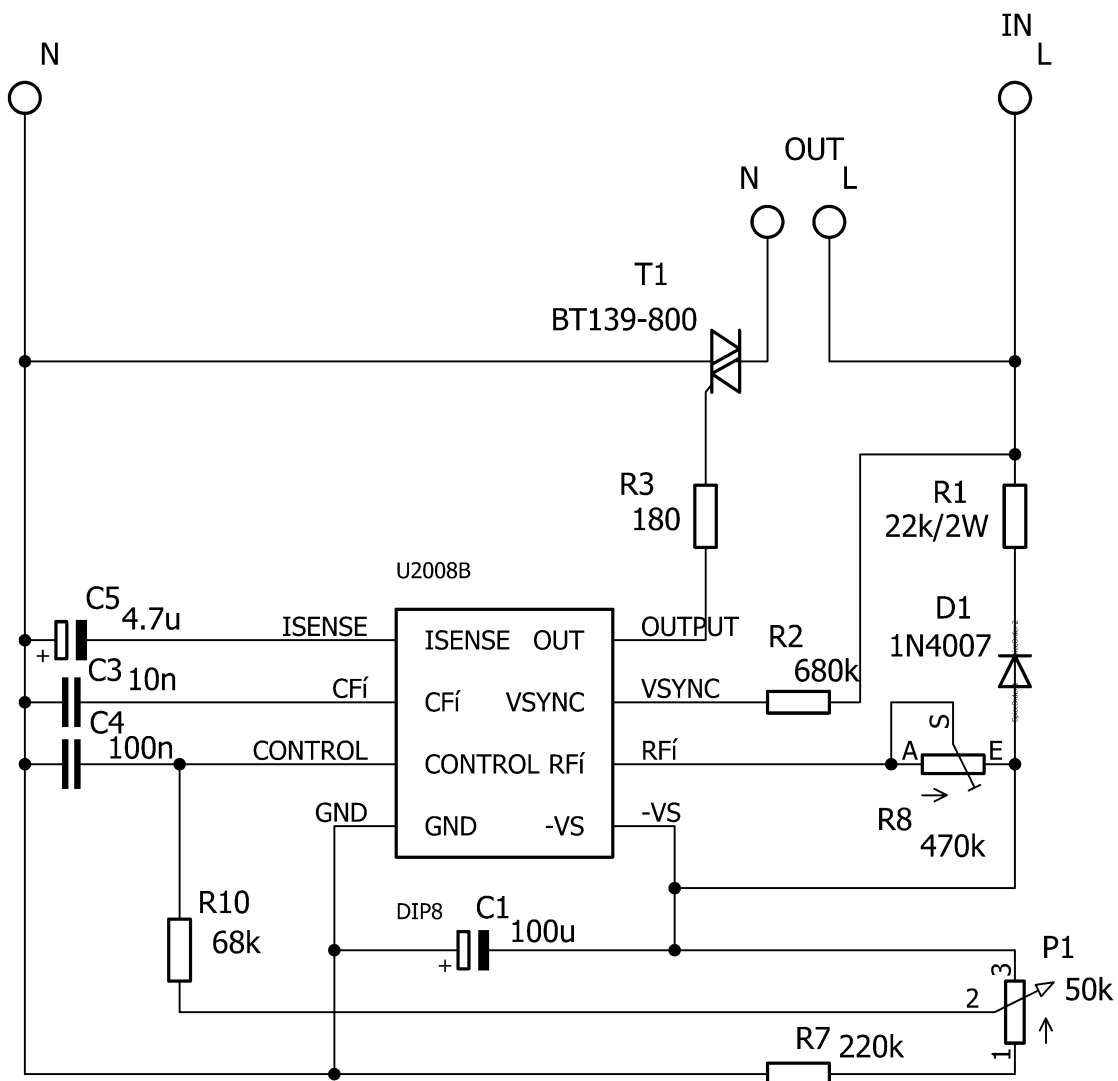


- [19] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Figure-3-Three-phase-feeder-induction-motor-with-soft-starter\\_fig3\\_291094688](https://www.researchgate.net/figure/Figure-3-Three-phase-feeder-induction-motor-with-soft-starter_fig3_291094688)
- [15] Basics of Soft Starter, Working Principle With Example and Advantages. *ElProCus – Electronic Projects for Engineering Students*. [online]. Copyright © Elprocus [cit. 22-04-19]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/soft-starter-principle-working/>
- [16] Starter of an induction motor. *SlideShare* [online]. Copyright © 2019 [cit. 28-04-19]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/sbpatel199688/starter-of-an-induction-motor>
- [17] ABB. Performance comparison between 2- and 3-phase controlled softstarters [online]. 2018 [cit.28-4-19]. Dostupné z: <http://searchext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SFC132392M0201&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [18] BAHADURE, Shushant, Krishna KARAKGIRI, Shrish PANDEY a N.M. SINGH. Two-phase soft start control of three-phase induction motor. *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, New Delhi, 2016
- [19] SOLSTART 1P Single Phase Analogue Soft Starter. Joliet Technologies Variable Speed Drives and Controls [online]. [cit.28-4-19]. Dostupné z: <https://joliettech.com/products/ac-variable-frequency-drives/solcon-soft-starters/solcon-solstart-1p-single-phase-analogue-soft-starter/>
- [20] Single phase soft start/stop. JAKI Enterprise Co.,Ltd [online]. [cit.28-4-19]. Dostupné z: <https://www.jaki.com.tw/en/single-phase-soft-start-stop-14p.html#gref>
- [21] Carlo Gavazzi. Motor Controller AC Semiconductor Motor Controller Type RSBS2325A2V11Cxx [online]. 2008 [cit.28-4-19]. Dostupné z: <https://www.enika.cz/data/files/produkty/komponenty/pohony/RSBS.pdf>
- [22] STC52 Series Motor Soft Starter SCR/thyristor firing card – Shenzhen Sinepower Technology Co., Ltd. [online]. [cit.28-4-19]. Dostupné z: <http://www.sinepower.cc/en/product/motor/2019-01-08/136.html>
- [23] Low Current Three Phase Soft Starter, High Torque Soft Starter For Air Conditioner Compressor. *Quality Electronic Soft Starter & Bypass Soft Starter Manufacturer* [online]. Copyright © 2018 [cit. 28-04-19]. Dostupné z: <http://www.electronicsoftstarter.com/sale-10849594-low-current-three-phase-soft-starter-high-torque-soft-starter-for-air-conditioner-compressor.html>
- [24] Atmel. Low-Cost Phase-Control IC with Soft Start [online]. [cit-28-4-19]. Dostupné z: [https://www.puhy.cz/dokumentace/datove\\_listy/datovylist\\_68120-1.pdf](https://www.puhy.cz/dokumentace/datove_listy/datovylist_68120-1.pdf)

## Seznam příloh

A	Schéma zapojení střídavého měniče napětí.....	I
B	Plošný spoj střídavého měniče napětí.....	II

## A. Schéma zapojení střídavého měniče napětí



## B. Plošný spoj střídavého měniče napětí

